非接触による光コンポーネントの自動レーザトリミング技術 (第二報) *

—光路軌道予測による最適化—

松 浦 寛** 杉 山 聡***

Automatic Non-contact Laser Trimming Technique for Optical Components (2nd Report)
—Optimized Approach by Supposition of Orbital Optical Propagation—

Hiroshi MATSUURA and Satoshi SUGIYAMA

Laser welding technology is essential to fix the collimators and mechanical parts for robust optical components. However the operator for this work must have a special skill of laser trimming. Therefore we developed automatic laser trimming technique by contactless probing. It is achieved by using the regular-relation between the direction of tilt by welding distortion and the orientation of laser shoot. This system is consists of a pulsed YAG laser with three laser irradiation devices and an optical power monitor only as a simple configuration. As a result, the laser trimming time to produce the completed component was performed in 65 seconds.

Key words: precision engineering, laser trimming, optical components, YAG laser, collimator, optical fiber, aspherical lens, automatically alignment technique

1. 序 論

光通信システムにおいて、光ルーティングの物理レイヤである ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) と呼ばれる装置には、アレイ導波路と 1x2 光スイッチを組み合わせたタイプが使われている¹⁾。しかし今後は、より拡張性が高い 1x9 波長選択光スイッチ (WSS: Wavelength Selective Switch) へと置き換えられていくであろう²⁾³⁾。一般的な WSS の内部構成を図 1 に示す。図中左に縦に並ぶ 10 本のコリメータが入出力ポートである。光路切り替えデバイスは、図中右にある LCOS (Liquid Crystal on Silicon) または MEMS (Micro Electro Mechanical System) 素子である。このような多くの光学部品を組み合わせた構成を短時間に精度良く組み立てる技術の確立が急務で、その中でも特に、高密度実装されるコリメータを筐体に取り付ける固定方法は、信頼性の高い製品を作るうえで重要になっている⁴⁾。

光通信用の光コンポーネントは、これまで様々な機能の複

合化がおこなわれてきたが、不況によるコスト重視志向と知的財産に関心が薄い新興企業の台頭が重なり、単機能で量産しやすい構造が主流となった。そのためコリメータの固定方法は、設備コストがかかるレーザ溶接は敬遠され、接着剤、および溶剤による固定になっていった。しかし、WSS は、10 本のコリメータ全て光路を平行にしなければならない。高密度実装された狭い場所への接着剤、および溶剤の適用は困難なため遠くからビームを絞って溶接できるレーザ溶接の方が優位である。ところがレーザ溶接は、溶接ポイントで必ず材料が変形し、光学部品の角度ズレが生じて、結合損失が大きく上昇する。オペレータが専用のジグを使い、結合損失の診断と損失の回復動作 (以後、トリミングと呼ぶ) をおこなっているが、高密度実装された狭い空間ではジグの使用は難しい。

本報では、このレーザ照射による変形を逆に利用して、レーザ照射方位とコリメータの挙動の相関から光路軌道を予測してレーザ照射方位を決め、レーザ照射により自動でトリミングをおこなう技術を開発したので、これについて述べる。

2. コリメータ調芯方法

2.1 コリメータの結合トランス

光コンポーネントを組立にはコリメータと呼ばれるシングルモード光ファイバとレンズを一体化した部品が使われる。WSS では、10 本全てのコリメータの光路を平行度 0.0013 度以内に並べなくては結合損失が 0.1 dB 以下にならない。ここで、 ω : コリメータビーム径、 x : コリメータの位置ずれ量、 θ : コリメータの角度ずれ量、 λ : 使用波長とすると、対向させたコリメータ同士の結合効率 η は、式 (1) より求めることができる⁵⁾。実際に使われる焦点距離 $f=2$ mm 前後のコリメータは、第

Fig. 1 Skeleton framework of the WSS

* 原稿受付 平成 21 年 9 月 21 日
** 正 会 員 古河電気工業 (株) (千葉県市原市八幡海岸通 6)
*** 古河電気工業 (株)

Fig. 2 A process of the laser trimming of the collimator after alignment

1 項 ≪ 第 2 項のため位置ずれより角度ずれのほうが結合損失劣化の影響を大きく受けることがわかる。

$$\eta = \frac{x^2}{\omega^2} + \frac{\pi^2 \theta^2 \omega^2}{\lambda^2} \quad (1)$$

2.2 従来のトリミング方法

コリメータを対向させた状態を図 2(1) に示す。これにより式 (1) で示した x 方向、および θ 方向の調芯が可能となる。調芯後にコリメータを固定するには、コリメータと筐体の間に球リングと呼ばれる部品を使う。この部品は、一方が平面、他方が球面状のリング部材で、球面をコリメータ側に向けて介在させる⁶⁾⁷⁾。コリメータのスリーブの先端外周部分を球状部分に被せることでコリメータの傾斜角度がどの方向に傾いても調整できる。コリメータの移動方向は、球リングのもう一方の平面部分が筐体と面接触するため調整できる。

次に、コリメータの固定手順、およびトリミングの手順を以下に示す。図 2(2) に調芯作業を終え、スリーブ先端外周部を球リングに被せた状態を示す。まず始めに、同時 3 方位 (R_1 , R_2 , R_3) からレーザ照射して筐体と球リングの固定をおこなう。この部分の溶接は、球リングと筐体が面で接触していることとスリーブの固定ではないため、結合損失の増加はない。

図 2(3) にスリーブと球リングを固定するレーザ溶接の方位と位置を示す。同時 3 方位 (S_1 , S_2 , S_3) からレーザ溶接をおこなうこの工程は、スリーブの固定が目的である。式 (1) で示した θ が大きく動くため、結合損失の増加が顕著である。コリメータが傾斜する原因は、溶接部が冷える際に生じる熱収縮により部材は照射側に歪むためである。結果として、光軸もこれに対応した方向に傾斜する。

図 2(4) にレーザ照射後、コリメータが矢印方向に傾いた状態を示す。実際に、全てのコリメータが傾き、結合損失が増加

Fig. 3 The enlarged picture of the laser welding of the collimator

する。コリメータの傾斜方位と傾斜量は予測不能である。ここでは、 S_1 の変形量が S_2 、および S_3 の変形量より大きく $-A$ 方向にコリメータが傾斜したとして説明する。

図 2(5) にトリミング作業を示す。実際には、どの方位にコリメータが傾いたかわからない。オペレータがジグを用いて弾性変形領域でコリメータをあらゆる方位に押して結合損失が改善する方位を調べている。仮に $+A$ 方向にコリメータを押して損失が改善されたとすると 180 度反対の T 方向からレーザを 1 回照射する。照射する光パワーは、結合損失量に比例して強くしている。これらを繰り返す、最終的に結合損失を初期の状態まで回復させる行為がトリミングである。図 3 にトリミング後の写真を示す。溶接強度を得るため部品の全周にレーザ溶接をおこなっている。このときの溶接スポット径は、300~400 μm である。

3. 自動レーザトリミング技術

3.1 光路軌道予測法の原理

自動化のために我々は、レーザを照射したときの光パワーの履歴を順次計算し、次に照射すべき方位を決める方法を考えた。図 4 を用いて原理を説明する。この図は、レーザ照射方位を表す空間座標とコリメータの傾斜量を結合損失で表したものを重ね合わせている。これにより、コリメータの傾斜

Fig. 4 A principle illustration of the optical orbital propagation method

方位とレーザ照射方位，すなわちレーザトリミングの方位との関係が明確になる。コリメータからの平行ビームがXY座標の交点 o を通り，XY面に垂直に伝搬する状態を理想としている。XY面の同心円は，式(1)において $x=0$ の条件で θ を変数にして結合効率をあらわしている。コリメータ傾斜量が大きいほど結合損失が悪くなることわかる。

自動レーザトリミングは，R，S方位のレーザ照射が終了した状態から光路軌道予測法のプログラムがスタートする。第1射目から反時計回りに順番にレーザを照射するとした。どのレーザ照射方位からでもレーザトリミングは可能である。しかし，レーザ照射ヘッドの間隔を極端に近接させて狭い内角で数値計算をすると誤差が生じやすいため互いの誤差が均等になる内角60度の正三角形にした。

始めに，スリーブと球リングの固定（S方位）が終了した時点で，コリメータが傾斜して図4の第1象限にあるポイント A_0 （結合損失4dB）であったとする。第1射目によりコリメータは，第1射目の照射方位と平行な方位に傾斜し，ポイント A_0 からポイント A_1 に移動する。第2射目でコリメータは，第2射目の照射方位と平行な方位に傾斜し，ポイント A_1 からポイント A_2 に移動する。第3射目により第3射目の照射方位と平行な方位に傾斜し，ポイント A_2 からポイント A_3 に移動する。そして，照射開始前のポイントである A_0 に戻る。

同様に，最初のポイントが第2象限の B_0 ，または第4象限の C_0 にあっても，同じようにポイントが移動する。これは特異点（3つのポイントの重心に o がないこと）を除き，損失の変化が決して同じ状態にはならない。このことを利用すると，それぞれのポイントでのレーザ照射方位と損失変化を解析的に解くことで，次にレーザを照射すべき方位，および強度を求めることができる。

3.2 レーザ照射ヘッドの座標系

レーザトリミングを自動化するためには，それぞれレーザ照射ヘッドが狙うべき空間上の位置に来よう座標の共通化が必要である。そこで，レーザ照射装置の中央を原点（ o ）として，各レーザ照射ヘッドに「座標」を持たせた。各レーザ照射ヘッドは，X軸を基準に方位 ϕ （0度，120度，240度）で設置されている。XY軸，およびレーザ照射ヘッド軸の方位は，図4と対応している。レーザ照射ヘッドの番号の添え字は省略した。

各レーザ照射ヘッド軸は，図5に示すXYZの直交座標系をとる。レーザ照射ヘッドは，出射点 s を原点とする Lx, Ly 面内の x, y 方向と照射光軸方向の f の3方向にステップモータを使って移動することができる。また，レーザ照射ヘッドは，それぞれ ψ 角30度上方から装置中央に設置するコンポーネントの溶接点を狙うよう配置されている。このときの座標変換を式(2)に示す。

$$\begin{aligned} X &= -(Lf + f) \cos(\psi) \sin(\phi) \\ &\quad - x \cos(\phi) - y \sin(\phi) - Lx \\ Y &= -(Lf + f) \cos(\psi) \cos(\phi) \\ &\quad + x \sin(\phi) - y \cos(\phi) - Ly \\ Z &= (Lf + f) \sin(\psi) - Lz \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 5 The coordinate transformation of the laser head position

3.3 光路軌道予測計算

これまで，理想的な状態で光路軌道予測の原理の説明をおこなった。実際には，レーザ照射パワー，溶接部のバリ，表面粗さ，およびスリーブと球リングの勘合を常に同じ状態にすることは難しく，溶接後のコリメータの傾斜方位と傾斜量に差がある。そのため，図6（レーザ照射方位を表す空間座標とコリメータの傾斜量を結合損失で表したものを重ね合わせている）に示すように，レーザ照射方位とコリメータ傾斜方位にずれが生じ，3点照射した後に P_0 ポイントに戻らない場合がある。したがって，照射位置は，解析的に求めるのではなく，光軸の振る舞いが理想状態に最も近くなるように未知数を決定することによって，近似的に求めることとした。

3射前のポイントを P_0 ，2射前のポイントを P_1 ，1射前のポイントを P_2 ，現在のポイントを P_3 で表す。各 P は，光軸の傾きが無い調芯終了時（原点 o ）からの光軸傾斜量で，傾斜方位まで含んだベクトル量である。 $\theta_0 \sim \theta_3$ は，各 P の結合損失の実測値から求められる光軸ずれの角度量， R は，各照射による光軸角度変化量（スカラー量）で，3射後の光軸角度ずれ方位を α で表す。既知の値は，レーザ照射ヘッドの照射方位3点の角度（ ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ）である。式(1)を用いて， R の値を一定として取り扱う。 R が大きく変わる場合は，3.4.1項でその処理方法を述べる。したがって，次に照射すべきトリミングのレーザ照射方位は，式(3)に示す未知の値である R, α と既知の値である ϕ ，結合損失から逆算できる θ_{3_real} を用いて求めていく。

$$\begin{aligned} P_3(x_3, y_3) &= (\theta_{3_real} \cos(\alpha), \theta_{3_real} \sin(\alpha)) \\ P_2(x_2, y_2) &= (x_3, y_3) \\ &\quad - (R \cos(\phi_3 + \pi), R \sin(\phi_3 + \pi)) \\ P_1(x_1, y_1) &= (x_2, y_2) \\ &\quad - (R \cos(\phi_2 + \pi), R \sin(\phi_2 + \pi)) \\ P_0(x_0, y_0) &= (x_1, y_1) \\ &\quad - (R \cos(\phi_1 + \pi), R \sin(\phi_1 + \pi)) \end{aligned} \quad (3)$$

これより， $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ は，以下で表される。

$$\begin{aligned} \theta_2^2 &= x_2^2 + y_2^2 \\ \theta_1^2 &= x_1^2 + y_1^2 \\ \theta_0^2 &= x_0^2 + y_0^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 6 The real behavior of the optical orbital propagation and laser head position

これらの式(4)と測定した結合損失から逆算した θ_{0_real} , θ_{1_real} , θ_{2_real} とが最も一致するよう最小二乗法を使い R , α を求める。実測値から逆算して得られた値には添え字 **real** をつけて区別する。実際には、 θ_{3_real} がすでにわかっているため α が得られれば最後にレーザ照射して移動した位置がわかり、次に照射するレーザ方位が即座に決まる。

3.4 オーバーラン対策

レーザトリミングをおこなうと結合損失の最適値のポイントを超えて損失が回復しない場合がある。この状態をオーバーランと呼ぶ。早期に判定して、これを回避しなければならない。

3.4.1 R 値の変動でのオーバーラン回避

通常のアプローチで算出された方位にレーザを照射しているにもかかわらず、コリメータが予測より大きく傾斜し、最適値を通過して結合損失が2回連続で悪くなることもある。これは前に示した原因により、通常ほぼ一定である R の値が大きく変わり、コリメータが予測より大きく傾斜することで起こる現象である。このときは、オーバーランと判定して、割り込みルーチンに飛び、2射目の反対方向から同一パワーでレーザを照射した後、元のアプローチに戻す。オーバーラン回避行動がおこなわれた一例を図7に示す。左軸は、レーザ照射方位（実線）で、右軸は、結合損失（点線）である。2回連

Fig. 7 The behavior of the parameters in the overrun motion

Fig. 8 The temporal change in the coupling loss state by the overrun

続して損失増加しているところを括弧付きの数字で示す。合計3度、割り込みルーチンに飛び回避行動がとられた。

いずれも3射目で結合損失は改善した。そして最終的に23射目で、このとき使用したコリメータの調心終了時の結合損失に近い0.21 dBまで回復させることができた。

3.4.2 損失波形検知によるオーバーラン回避

レーザトリミングの最終段階に近づくとき、コリメータの結合損失の最適値付近でレーザ照射をおこなうため、全てのパラメータの変化量が少なくなり計算誤差が増える。本実験では、結合損失は、光パワーメータで計測したデータをシリアル通信でコンピュータに送り、レーザ出力条件、およびレーザ照射ヘッドの制御をおこなっているが、波形検知は、高速でサンプリングする必要がある。そこで光パワーメータのアナログ出力をデジタルオシロスコープで測定してパターンマッチングによってオーバーラン回避をおこなった。

パワー変動測定結果の例を図8に示す。実線（オーバーラン有り）、点線（オーバーラン無し）いずれもレーザ照射によってレベルAからレベルBに損失が改善している。しかし、オーバーランをした場合と、そうでない場合で、波形が異なっている。オーバーランがある場合は、光軸角度が変化する途中で損失の極大値であるレベルCを通るが、オーバーランのない場合は極大値を持たない。

4. レーザトリミング実験

4.1 レーザ照射パワーの決定

プログラムは、レーザトリミング中の結合損失の状態に応じて適切なレーザ照射パワーに自動で変更する。 R の値は、焦点位置のずれや部品形状のばらつきの影響を受けて多少ばらつくが、レーザ照射パワーと比例関係にある。

各結合損失におけるレーザ照射設定値を表1に示す。パルス幅は、5 msecで一定とし、設定電圧を変えてレーザ照射パワーを制御している。コリメータの結合損失値をあらかじめプログラムに入力し、目標値に近づくにしたがって照射強度を下げ、オーバーランしないようにする。また、レーザ照射パワー変更時には、内部シャッターを閉じて“空撃ち”をおこなう。パワー変更前の条件のエネルギーがチャージ回路に溜まっているためである。

4.2 実験結果

オーバーラン回避のプログラムを作動させてトリミング実

Table 1 Laser-irradiance condition for the experiment

Voltage	Energy	Relative Loss
330 V	7.71 mJ	>5 dB
310 V	6.33 mJ	>2 dB
290 V	5.04 mJ	>1 dB
270 V	3.94 mJ	>0.5 dB
250 V	2.90 mJ	>0.3 dB
230 V	2.00 mJ	<0.3 dB

Fig. 9 The change in the typical state of the coupling loss during the laser trimming

験をおこなった。トリミングの1射目から図2(5)に示したスリーブのエッジ部分を主に照射し、目標値プラス0.05 dBを切った時点でプログラムが終了する。トリミングの典型例を図9に示す。XY軸は、コリメータの傾斜角度で、これに結合損失の値を同心円にして重ねている。最適結合に近づいたときに、オーバーランプログラムが働き、反方向位にレーザが照射され、結合損失0.25 dB（目標値: 0.23 dB）まで下げることができた。図中の矢印は、トリミングのレーザ照射方位である。縦横軸は、コリメータの傾斜角度で、同心円は、それに対応した結合損失である。

図10は、ワーストケース例である。頻繁にオーバーラン回避プログラムが働いているため照射回数が多いが、トリミング終了値の条件を満たしている。次に、オペレータと自動化プログラムの作業時間を比較した。サンプリング数は、20個である。照射回数では、オペレータが平均10回トリミング照射をしたのに対して、自動化プログラムでは平均20回と多かった。これはオペレータが熟練しているためだと思われる。

Fig. 10 The change in the atypical state of the coupling loss during the laser trimming

一方でトリミング作業時間は、オペレータが140秒であったのに対して自動化プログラムでは最大65秒であった。

5. 結 論

レーザによる非接触式の自動トリミング技術の開発をおこなった。光路軌道予測にオーバーラン回避プログラムを組み合わせ、結合トレランスがわかっているコリメータを使って評価した結果、調芯時の結合損失を基準とした相対損失で0.05 dB以内、トリミングに要した時間は最長65秒であった。この予測方式を使えば、他の光学部品のレーザ溶接固定にも展開できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 最新フォトニックネットワーク技術の概要: 日比野 他: NTT 技術ジャーナル, 19, 10, (2007)8.
- 2) Jui-che Tsai and Ming C. Wu: A High Port-Count Wavelength-Selective Switch Using a Large Scan-Angle, High Fill-Factor, Two-Axis MEMS Scanner Array, IEEE Photonics Technology Letters, 18, 13, July 1, 2006.
- 3) WSS Switching Engine Technologies: Pierre Wall, Paul Colbourne, Christopher Reimer, and Sheldon McLaughlin, Optical Fiber Communication Conference 2008, OWC1, February 24, 2008.
- 4) Generic Reliability Assurance Requirements for Passive Optical Components, Replaces TA-NWT-001221 Issue02, Document Number GR-1221.
- 5) 河野健二: 光デバイスのための光結合系の基礎と応用, pp40-45, (1991) 現代工学社. (in Japanese)
- 6) JP 3,650,591
- 7) JP 3,938,490