研究論文

光ファイバプラグの自動心合わせ加工システム に関する研究*

古川勇二** 大石 進** 平井聖児*** 渡辺昌満† 小川芳明††

Machining System of Optical Fiber Plug with Automatic Centering

Yuji FURUKAWA, Susumu OHISHI, Seiji HIRAI, Masamitsu WATANABE and Yoshiaki OGAWA

Usually, two optical fiber plugs are connected by facing each endface of the plug ferrules and inserting them into the alignment sleeve. The concentricity of the fiber core with the plug ferrule is, therefore, most important to decrease misalignment at the connection, hence the loss of signal transfer in fiber optic links. The present paper aims to develop a machining system capable of turning the plug's cylindrical surface so as to become concentric with the fiber core within the tolerance of $\pm 0.5 \mu\text{m}$. The principle of the developed machining system is as follows. The light incident at one end of the fiber is guided and emitted from the endface of the plug ferrule to be machined. This light is amplified and detected by the position sensitive device (PSD), then the center of the light spot is calculated. The plug ferrule to be machined is mounted on the XY table and positioned so that the fiber core is concentric with the center of rotating cutter according to the output signal of the PSD. The development of each element and the overall performance of the system are described.

Key words: optical fiber, plug ferrule machining system, optical position sensing, XY positioning table, concentricity

1. 緒 言

光ファイバによる光通信では、送信側と受信側との間に通常6~7か所のコネクタ接続が必要となり、これに用いるコネクタは、ファイバを所定の位置に保持したプラグとプラグ同士を対向整列させるアダプタから成る¹⁾。電気信号のコネクタ接続との大きな違いは、接続損失を低減するために、接続するファイバコア同士の中心軸を正確に位置合わせしなければならないことである¹⁾²⁾。すなわち、その接続形式からして、ファイバコアとプラグとの同心度または同軸度を高めることが要求される。

実用技術としては、ファイバが挿入される微細孔に合わせプラグを成形する手法²⁾や、プラグ外周を除去加工する手法が代表的であるが、高精度なプラグはほとんど後者によっている。また後者の製造法におい

ても、プラグにファイバを挿入する前にプラグ外周を研削仕上するもの³⁾と、ファイバ挿入後に、ファイバ中心を基準にプラグ外周を旋削仕上するもの⁴⁾がある。

本研究は生産性の高い後者の手法を対象にしたものであり、従来手動で行っているファイバ中心の検出と、それをプラグの周囲を回転する工具の回転中心に合わせる作業を、全自動にするための機構とその性能評価を行っている。

2. 心合わせ加工の原理と加工システムの構成

本研究は、マルチモード光ファイバプラグにおいて、図1に示すファイバコアの軸心とフェルールの軸心と

Fig. 1 Required accuracy of an optical fiber plug and the principle of plug OD machining

* 原稿受付 昭和61年8月27日。昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和58年10月15日）にて発表

** 正会員 東京都立大学工学部（東京都世田谷区深沢2-1-1）

*** 日本光学工業(株)（東京都品川区西大井1-6-3）

† 正会員 日本電気(株)（山梨市小原西843）

†† 正会員 日本電気(株)（大月市大月町真木747）

Fig. 2 Plug machining system with automatic centering

を同心に加工する，いわゆる「心合わせ加工」の自動化を目的としている．同心度は接続損失から規定され，同図に示すように，一般的には $3\mu\text{m}$ である．心合わせ加工の原理は，加工するプラグと反対側のプラグより光を入射し，加工側より射出する光束の中心を光学的に検出し，その中心を回転する切削工具の回転中心に一致させた後，フェール外周を切削するものである．

このための加工システムの構成は図2のようにした．プラグに要求される精度から，位置決めと位置検出には $0.1\mu\text{m}$ 台の精度を目標とする．

3. 二次元光位置検出部

二次元位置検出素子としては，CCD，MOSなどに代表される多数の画素を集積した走査形とPSD (Position Sensitive Device) に代表される非走査形がある．これらの位置分解能は，前者では画素間隔，後者では雑音電流によって主として決まるが，いずれも $10\mu\text{m}$ 以上である．そこで，中空主軸内にレンズを置いてプラグ端が位置センサの受光面上に拡大されて結像するような配置とし，位置センサの見かけの分解能を高めることにした．

この場合，受光面の大きい素子ほど有利であるから，本研究では $10\times 10\text{mm}$ の受光面を持つPSDを採用した．プラグの前加工誤差とチャックに取り付けた時の誤差を合わせて最大 $150\mu\text{m}$ ，コア径を $50\mu\text{m}$ とすれば，可能なレンズ倍率は最大28になるが，実験では余裕を持たせて25とした．この結果， $0.4\mu\text{m}$ の位置分解能が期待できる．

PSDの出力信号の安定性は受光面に照射される光のパワーの安定性に依存する⁵⁾．PSDの分光感度特性ならびに集光性が良いことから，光源としてまず出力 5mW のHe-Neレーザを検討した．通常のHe-Neレーザでは光フィードバックによる出力の安定化が図

Fig. 3 Effect of light source on the stability of position signal

られていないため，PSD受光面上の任意の位置に光スポットを固定しても，図3(a)に示すように，位置信号(X, Y)は変動し，変位に換算すると最大 $40\mu\text{m}$ にも及んだ．照射パワーに対応する Σ 電圧によって補正してもなお精度不足であった．そこで，熱発生や集光性に難点はあるが，光源としてより安定性の高いハロゲンランプを安定化電源とともに用いることにした．このハロゲン光を楕円面鏡で集光し，熱の影響を避けるためにファイババンドルを介して，加工対象のファイバに入射するようにした．この場合の安定性は図3(b)のごとく比較的良く，プラグ端の変位に換算して $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ の変動に抑えることができる．

図4はプラグ端の変位とPSD出力電圧との関係を実測したもので，位置分解能はX方向が $0.4\mu\text{m}$ ，Y方向が $0.5\mu\text{m}$ であり，当初の目的を一応達成していると考えられる．

4. XY位置決めステージ

XYステージはステッピングモータによるボールねじ駆動とした．この理由は開ループでの位置決めが容易なためであるが，ステップ角とねじのリードからして，ステージをボールねじで直接駆動して $0.1\mu\text{m}$ 台の精度を得ることは難しい．そこで，図5に示すようにくさびの原理を利用して，送り量を縮小してステージに伝達する構造とした．すなわち， ϕ と l をボールねじの回転角とリードとすれば，送り量 $\phi l / (2\pi)$ は $\sin \theta$ だけ縮小される．ただし，ボールねじ本来の使

Fig. 4 Relation between the position of light spot and the output voltage of position sensitive device

Fig. 5 A stage with fine feed mechanism

い方は異なるこの機構では、微小送りが可能なものの、ナットの振れがこれに直接重ね合わされてしまう。この振れを抑制するために、ボールねじと平行に案内を設けた。

図6が試作したXYステージであり、図5の構造のものを重ね合わせている。表1にこのステージの主な特性を示す。ここで、変位縮小率 $\sin \theta$ は1/100を目標としたが設定が難しかったため、1/100に近い値となるよう試行錯誤的に定めた。位置決め精度などはJIS B 6330に従って測定した。位置決め精度が良くないのは、主としてボールねじのナットの振れによるもので、振れ抑制の案内を設けても振れを0にすることはできなかった。

したがって、ただ1回の自動心合わせサイクル(ファイバコアの位置を検出して1回だけステージを移動させる)で所定の心合わせが完了するのは難しく、この

Stepping motor: step angle=0.9 deg/step, holding torque=9.8 N·m
Ball screw: $\phi 10$, lead=2.0±0.002
Nut: single(preloaded)
Ball spline: $\phi 8$

Fig. 6 XY stage

Table 1 Characteristics of XY stage

	X axis	Y axis
Reduction ratio	1/94.0	1/97.5
Stroke	400 μm	400 μm
Positioning accuracy	2.0 μm	4.0 μm
Repeatability	±0.5 μm	±0.9 μm
Lost motion	0.3 μm	0.4 μm
Crosstalk	1.2 μm	0.5 μm
Static stiffness	7.0 N/ μm	6.9 N/ μm

Fig. 7 Kinematic model of the stage

サイクルを繰り返す必要がある。この場合、前回のサイクルでステージが停止した際の残留振動が次のコア位置検出結果に影響しないよう、これが整定するまで待たなければならない。試作したステージの構造では高い減衰は望めないから、整定時間を短くするためにはステージの固有振動数を高める必要がある。

図7はステージの力学モデルである。ここで、 J_1 : モータの慣性、 K_1, J_2 : カップリングのねじり剛性と慣性、 K_2, J_3 : ボールねじのねじり剛性と慣性、 K_3 : ナットの軸方向剛性、 M_1 : ナット、ガイドバー、腕な

どの質量, K_4 : 腕-ステージ間の剛性, M_2 : ステージの質量, N : 縮小率とすれば, 運動方程式は次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 &= T + K_1(\theta_2 - \theta_1) \\ J_2 \ddot{\theta}_2 &= K_1(\theta_1 - \theta_2) + K_2(\theta_3 - \theta_2) \\ J_3 \ddot{\theta}_3 &= K_2(\theta_2 - \theta_3) + \frac{l}{2\pi} K_3(x_2 - x_1) \\ M_1 \ddot{x}_2 &= K_3(x_1 - x_2) + NK_4(x_4 - x_3) \\ M_2 \ddot{x}_4 &= K_4(x_3 - x_4) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

そして固有振動数に着目すれば, 振動数方程式は,

$$\begin{vmatrix} -\omega^2 J_1 + K_1 & -K_1 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 & -\omega^2 J_2 + K_1 + K_2 & -K_2 & 0 & 0 \\ 0 & -K_2 & -\omega^2 J_3 + K_2 + \left(\frac{l}{2\pi}\right)^2 K_3 & -\frac{l}{2\pi} K_3 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{l}{2\pi} K_3 & -\omega^2 M_1 + K_3 + N^2 K_4 & -NK_4 \\ 0 & 0 & 0 & -NK_4 & -\omega^2 M_2 + K_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

となり, 諸数値を代入して固有振動数を求めると 333, 385, 696, 735, 1 280 Hz となる. 試作のステージではボールスプライン軸部の剛性 ($K_4 \approx 7 \text{ N}/\mu\text{m}$) が低いため, 最低次の 333 Hz がステージの固有振動数となっており, 実測値とも一致する. よって, ステージ停止の際にはこの振動が残留すると予想される.

図 8 はステージ停止時の残留振動の測定例であるが, 実際には約 140 Hz というステッピングモータの固有振動数の影響が現れ, 整定に 0.2~0.25 s を要している. なお, この結果からモータの影響がなければ, 上記振動数の振動は 0.08~0.1 s で整定すると概算できる.

一般に, このような変位縮小機構を備えたステージでは, ステージ以外の振動変位も同じ比率で縮小されるため, 残留振動の観点からはステージ部の固有振動数を高めれば良い.

5. 自動心合わせシステムの性能

図 2 の構成を具体化したものを図 9 に示す. レンズ内蔵の切削ヘッドを備えた中空主軸の前後に, 切削送り用 Z テーブル上に据え付けられた XY ステージと, PSD が配置されており, コンピュータが検出された位置情報を処理してステージの位置決めを行う. 切削加工に当たっては上記三つの構成要素相互の正確なライメント合わせが必要で, これについては後述する.

このシステムの自動心合わせに関する精度は, プラグに要求される精度と位置検出器の分解能から, $\pm 0.5 \mu\text{m}$ を目標とした. この場合, 前述の理由から, 所望の

Fig. 8 Residual vibration of XY stage

精度が得られるまで心合わせサイクルを繰り返す必要がある. 図 10 は, ランダムに任意の位置から心合わせを繰り返し, $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 内に収まるまでの心合わせ回

Fig. 9 Plug machining system

Fig. 10 Centering characteristic of the system

Fig. 11 Aligning of optical and spindle axes

数を示すヒストグラムである。これから平均の心合わせ回数は約7であり、これに要する時間は約2sであった。

6. 自動心合わせ加工実験

6.1 システムのアライメント合わせ

$\pm 0.5 \mu\text{m}$ の自動心合わせ精度が得られることが分かったが、加工に当たっては以下のアライメント合わせを正確に行わなければならない。すなわち、

- (1) 切削ヘッド内のレンズ光軸と中空主軸の回転軸
- (2) 主軸回転中心と位置検出器の中心
- (3) 主軸回転中心とXYステージの中心およびZ軸

結像位置関係にある場合、幾何光学によれば主軸回転軸に対するレンズ光軸の傾きは関係しないので、光軸のずれのみを調整すれば良い。いま、ファイバ、レンズ内蔵主軸およびスクリーンを図11(a)のように配した時、主軸を回転すると同図(b)のようにスクリーン上の像は振れ回る。この振れ回り量は、光軸のずれを r 、結像倍率を M とすれば、 $2r(M+1)$ である。軸ずれのチェックは M を大とすれば容易であるから、 $M=500$ ($\phi 50 \mu\text{m}$ のコアの像は $\phi 25 \text{mm}$)とし、像の振れ回り量が1mm以下($2r$ が $2 \mu\text{m}$ 以下)となるよう調整した。使用した主軸自体の振れが $1.2 \mu\text{m}$ あるので、これ以下の調整は難しい。次に、スクリーンをPSDに置き換え、ファイバを主軸の回転軸

Fig. 12 A method of centering when optical and spindle axes are misaligned

からわずかに偏心させた位置で切削ヘッドに固定し、全体を回転させる(図11(c))。するとコア像はPSDの受光面上で円を描くから、この円の中心とPSDの中心を一致させればすべてのアライメント合わせが終了したことになる。

以上の調整の後、主軸を回転させないで自動心合わせを行った。次に主軸を回転させるとPSD上でコア像が円を描いてしまい、これはレンズの光軸がずれていることを意味している。円の直径と結像倍率から、このずれは約 $2 \mu\text{m}$ と推定でき、ファイバコアの中心は主軸の回転軸に対して実際は約 $2.1 \mu\text{m}$ 偏心していることになる。

このように、レンズ光軸のずれをなくすことは非常に難しいため、心合わせに要する時間はかかるがより高い心合わせ精度が期待できる方法として、以下に述べるように、主軸を回転させた状態で自動心合わせする方法を採った。

6.2 自動心合わせ加工

レンズの光軸が主軸の回転軸に対して傾きとずれを持っている一般的な場合において、ファイバを切削ヘッドに固定して全体を回転させると、図12(a)のように、PSDの受光面上にコア像による円が描ける。そこで、図中の太い矢印のように、この円の中心をPSDの中心に一致させれば、PSDの中心と主軸の回転中心が一致することになる。心合わせに当たっては、主軸を回転させておけば図11(b)と同じく円が描ける。したがって、この円の中心がPSDの中心に一致するよう心合わせすれば、図12(b)のようにファイバコア中心は主軸の回転軸上に心合わせされる。

図13はこの自動心合わせのアルゴリズムである。主

Fig. 13 Automatic centering algorithm

軸を一定の低速で回転させておき、振れ回るファイバコア像の位置を1回転あたり3点測定する。測定値を円の方程式に代入して中心座標を算出し、これを主軸回転中心からの偏差とする。この偏差が前出の目標心合わせ精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以内でない場合には、偏差に対応するステップ数をモータに与え、ステージを駆動する。そして再び偏差を求め、これが規定値 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 内に収まるまで心合わせサイクルを繰り返す。

図14は、このように心合わせを行って切削した結果を、プラグの真円度とファイバコアに対する偏心量について示したものである。主要な切削条件は図に併記した通りであり、1回の切削で完了するよう切削ヘッドには粗削り用と仕上削り用2本のバイトが備えられている。測定結果の偏心量は、真円度測定器の回転軸上に設置した顕微鏡によってコア中心を出し、記録したものである。

本研究の主題である偏心量に関しては、ほぼ要求精度を満足しているが、心合わせ精度に比べて5~7倍悪い。予想される切削力に対して切削ヘッド部やステージ部は十分な剛性を持っているので、工具のセットアップや切削に不慣れなことが、精度低下に大きく影

Work: SUS 303, Tool: tungsten carbide,
Depth of cut: 115 μm (rough) and 10 μm (finish)
Cutting speed: 3000 rpm, Feed rate: 20 mm/min

Fig. 14 Results of cutting test

響していると考えられる。このため、真円度も要求精度の3~6倍と悪くなっているものと思われる。平均的な心合わせ回数は8回ほどであったが、前述のような心合わせアルゴリズムとしたために、1回の心合わせに約1sを必要とし、心合わせが完了するのに約10s要した。

7. 結 言

本研究では、マルチモード光ファイバの挿入されたフェルル外周の加工に関して、ファイバコアとフェルルとの同心度が $3 \mu\text{m}$ 以下、という一般的な要求精度をほぼ満足する自動「心合わせ加工」システムを開発した。

光位置検出器の位置分解能は受光面に照射される光量に大きな影響を受けるため、本システムをこのままさらに高い精度の要求されるコア径 $10 \mu\text{m}$ のシングルモード光ファイバフェルルの加工に適用することは困難である。しかしながら、本システムの代替方式であり、また従来技術である人間がITVによってコア

像をモニタし、手動で心合わせを行った後に切削する方式に比較すれば、心合わせ精度とその再現性は数倍向上し、心合わせに要する時間も短縮することができた。加工結果には工具のセットアップなどが微妙に影響することが多いために熟練者に頼らざるを得ない部分があり、今後の検討課題と考えられる。

文 献

- 1) 黒地則夫：光コネクタ，精密機械，50，1（1984）122。

- 2) 奈良茂男：プラスチックの超精密成形技術，精密機械，48，4（1982）522。
- 3) 小山善貞，清水基夫，大友善兵衛：高精度光ファイバコネクタの開発および実用化，精密機械，47，3（1981）368。
- 4) 後川昭雄，黒地則夫，中山 治，山田 樹：光ファイバ接合の精密加工装置の開発，昭和54年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集（1979）581。
- 5) 倉沢一男，山本晃永：非走査形ポジションセンサ，Optics E，16（1981.3）79。

（p.1370 より続く）

▽工作機械産業が直面している問題点＝汎用 NC 工作機械を中心とした大量生産方式によって全体として需要に比べ供給能力過剰の状態に陥っている。このため販売競争激化による収益の低下，流通秩序の混乱などが発生しやすい状況にある。NC 工作機械の生産増加は，NC 装置など外部購入品への依存を増やし，工作機械メーカーの付加価値率を低下させ，企業収益が低水準にとどまる傾向に出ている。

このような状況のもとで生じる厳しい競争は，① 研究開発投資は資金回収リスクが大，② 中小規模の企業が多く，研究開発要員の確保が困難，③ 従来からユーザ主導の工作機械開発が多く，工作機械メーカー独自の研究開発意欲が必ずしも十分でない——などの理由から，研究開発投資が低水準にとどまっている。

特に汎用 NC 工作機械以後の技術に対する研究開発投資が不十分で，将来予想されるシステム化，高度化などでは技術面で問題がある。

また，通商摩擦を回避するため，米国との間で輸出自主規制が開始され，EC についても 56 年以降輸入監視品目に指定されている。

今後，通商摩擦の問題を起こすことなく，輸出の安定化と外国から優れた工作機械の輸入利用など諸外国の工

作機械産業との共存が課題である。

工作機械産業の将来展望

▽需給動向＝世界規模での需要予測は非常に困難だが，過去のトレンドから予測すると，中長期的に緩やかな拡大基調が続くものと思われる。供給側においては，非 NC および NC 工作機械について NICS（新興工業国群）による供給の増大が見込まれることなどにより，一部機種は供給過剰に陥るおそれがある。今後の国内需要は，62 年度も前年度に引き続き大幅に需要が減退する。63 年度から緩やかな回復を示すものの，過去最高の 6703 億円を記録した 60 年度の水準に戻るのには 65 年度ごろになると思われる。

現在，工作機械生産の約 5 割を占める NC 旋盤と MC の国内需要を予測すると，NC 旋盤は 62 年度も引き続き低迷し，66 年度においても 59 年度の水準の回復は困難，MC は 62 年度は NC 旋盤同様に引き続き低迷が続くが，その後は比較的順調に回復していくものと思われる。わが国工作機械産業の生産能力のレベルからすると，需要が 60 年度水準を回復すると思われる数年間においては，かつて経験したことがないほど大きく，かつ長い生産能力過剰の状態に直面するおそれがある。

今後の輸出は，通商摩擦に留意すべきことを考えると，極めて緩やかな伸びにとどまる。円ベースの金額で 60 年度の水準を回復するのは 70 年度以降になる。

輸入は国内設備投資の冷え込みから，当面は横ばいまたは微増程度にとどまり，以後は増加に転じ，内需の拡大テンポ以上の増加率を示すと思われる。

▽技術動向＝工作機械の自動化・システム化は FA の基準単位である FMS などで生産の自動化に貢献してきたが，今後はネットワーク技術，センサ技術，人工知能などを取り入れつつ，FA に対応した自動化，システム化技術の進展が期待される。また，高精度化・超精密化のニーズに対応するため，高剛性設計，高精度軸受，非接触オンマシン計測の開発などが進む。新素材の利用の拡大に対しては，工作機械は機械剛性の向上，工具の開発などによる切削加工領域の拡大といった技術開発が進む。さらにレーザ，イオンなどを利用した非切削加工技術の高度化や，切削加工と非切削加工の複合化などの技術開発が進展すると期待される。（p.1439 へ続く）

年	日 本		米 国	
	平均純利益 率対売上高 %	研究開発比 率対売上高 %	平均純利益 率対売上高 %	研究開発比 率対売上高 %
1975	△ 2.2	1.2	8.9	3.6
1976	△ 2.2	1.1	9.3	4.2
1977	0.6	1.0	7.6	4.1
1978	6.2	1.0	7.4	3.9
1979	9.2	0.9	12.0	3.7
1980	10.3	0.8	12.9	4.2
1981	10.2	0.9	15.2	4.3
1982	7.2	1.3	5.0	
1983	4.4	1.3	△ 9.6	
1984	6.5	1.3	△ 3.2	
1985	9.0	1.3	△ 0.6	

資料：日本は日工会経営状況調査による。米国は NMTBA（米国工作機械工業会）資料による