

自由曲面金型加工機の開発

The Development of a Free-Form Surfacing Machine

大 柳 泰 介* 松 本 安 弘* 藤 本 章 弘*
Oyanagi, Taisuke Matsumoto, Yasuhiro Fujimoto, Akihiro

要旨

近年、光学ユニットにおける高機能化・コンパクト化・コストダウン要求に対し、非球面から更に進んだ自由曲面や回折面を有する光学素子の活用が有効な手段となっている。また、素子自体に求められる形状精度も年々厳しくなり、これら光学素子の金型を加工するための高精度自由曲面金型加工機の開発に取り組んだ。

本稿では、加工機の紹介と、主な開発内容及び加工実例を報告する。

Abstract

With the recent demand for optical units of high functionality, smaller size, and lower cost, an effective response is to use optical elements whose advanced aspherical devices comprise free-form and diffractive optical devices. Because the profile accuracy required of optical devices also increases every year, we have targeted development of a free-form surfacing machine to satisfy the need for high precision free-form dies. This paper describes such a free-form surfacing machine, the principal features of its development, and its practical application.

1 はじめに

本開発は、当初情報機器用レーザー走査光学系をターゲットとした。そして、光学設計部署と連携することで2000年には業界初の自由曲面ミラー（2枚構成）搭載のモノクロMFP Di450 / Di550 が上市され、その後次々と本加工機による自由曲面走査レンズが採用されることとなった。最近では、自由曲面と回折面を複合した光源部光学素子DOEコリメータも量産展開している。

2 加工機構成と開発コンセプト

プラスチック光学素子用金型加工を前提に、自由曲面を加工するのに必要な直交3軸駆動系と、工具を高速回転させ鏡面を得るフライカット加工用工具スピンドル、及び回転対称形状にも対応できる機能と、要求される50nm以下の加工精度を実現することを目指した。

加工精度を満足させるポイントは、低振動・高剛性・

高速加工(温度変動の影響を受けない短時間加工)があり、それと相反する加工自由度の両立が本開発のカギとなった。具体的には、

① 加工自由度

- ・直動3軸+回転1軸の4軸制御NCと工具スピンドル
- ・長尺 $f\theta$ まで対応できる加工エリア350×150×150mm

② 高速高精度

- ・駆動部の高速追従性を高める非接触構成（静圧案内+リニアモータ）

③ 鏡面確保

- ・加工点剛性確保（駆動系制御剛性の向上）と高速回転時にも低振動かつ振れの無い工具スピンドル

を主眼に加工機開発を進めた。

Photo. 1 に自由曲面フライカット加工の様子、Fig. 1 に本加工機の概略構成図、Table 1 に仕様を示す。



Photo.1 Free-form cutting

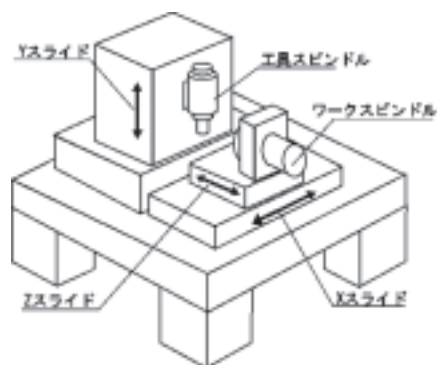


Fig.1 Structure of the free-form surface machine

* コニカミノルタオプト(株) 光学技術センター

Table 1 Specifications of the machine

加工軸	X	Y	Z
移動量	250mm	150mm	150mm
解像	油圧伝達式		
最高速	0.2mm以下/100mm		
駆動方式	リニアモータ駆動		
フィードバック	リニアスケール(分解0.27mm)		
分解能	1mm		
最大移動速度	1,000mm/min		
スピンドル	工業軸	ワーク軸	C軸
形式	高剛性方式空気静圧	多孔質陶瓷静圧	ニードル
最高回転数	50000rpm	1500rpm	3rpm
毎分回転数	—	0.001度	0.00001度

リニアモータ仕様	X	Y	Z
空荷駆動速度(m/s)	0.4	0.4	0.3
推力密度(N/A)	61	43	32
最大電流(A)	4	4	4
有効ストローク(mm)	250	150	150
コイル配置寸法	90	45	40

3 開発内容

加工自由度・高速高精度・鏡面確保はそれぞれ相反する内容であり、それらを満足させるため数多くの課題が現在も存在しているが、以下に今までに取り組んだ主な開発内容を紹介する。

3. 1 リニアモータ

高速高精度かつ切削後研磨を必要としない表面粗さを得るには、加工負荷やスピンドル振動等の影響を受けないサーボ剛性が必要である。サーボゲイン（特にポジションループゲイン）を上げるため、モータ配置やモータ自体のメカ剛性、リニアスケール保持部等フィードバック系全体の剛性アップに注力した。又、モータ設計面では、コイルからの発熱を最小限にするため電流よりも磁力重視で推力を得るよう設計しているが、駆動系自体が完全な非接触であり摩擦力がないため、モータのパワーが過剰だと発振しやすくなりサーボゲインを高められない。ただ、パワーを下げ過ぎると立上り特性が低下するなど問題があり、モータパワーの最適化が重要である。

以下Fig. 2に、磁束密度を半減させることによりポジションループゲインを1.5倍に高め、サーボロック状態の位置偏差（テーブルの駆動方向振動量）を10nmから5nmに減少させた例を示す。各軸の振動を5nm以下にすることで十分な自由曲面鏡面加工が実現できている。

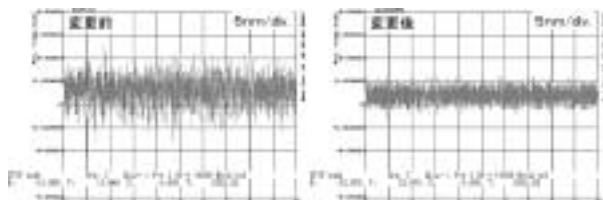


Fig.2 Position error

3. 2 工具スピンドル

ダイヤモンド工具1枚刃を回転させて加工するフライカット加工は、振動を誘起しやすく数千rpmでの加工が一般的で、その分送り速度も遅くなり長時間加工となる。

高速加工を実現するには、数万rpmでも軸振れ・振動の少ない工具スピンドルが必要であるが、市販のスピンドルには性能面で満足のいくものがなく、剛性の高い溝補償方式空気静圧軸受けとコギング等振動発生のないコアレスサーボモータを組合わせたオリジナルスピンドルにより、20000rpm～40000rpmでの高速フライカットが可能となった。Fig. 3に軸受け・モータ各方式の組合わせによる性能比較を示す。非同期成分とは加工面の表面粗さに影響を与える非線り返し軸振れ精度である。

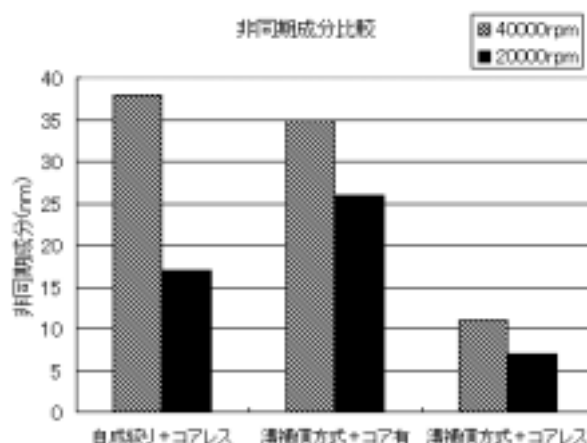


Fig.3 Non-repeatable runout

数万rpmでの加工が可能になり、ステージの高速高精度駆動と合せ、一般的なフライカット加工の1/5以下の短時間加工が可能になったが、もうひとつの狙いに高周速加工（工具スピードの向上）による切削負荷の低減がある。実際に、一回当りの切削量を同一にした場合、

Fig. 4に示すように周速1000m/min（回転数10000rpm）以上の高周速領域に入ると切削負荷が主分力・背分力ともに一気に減少しているのがわかる。（ワーク:ニッケルメッキ）

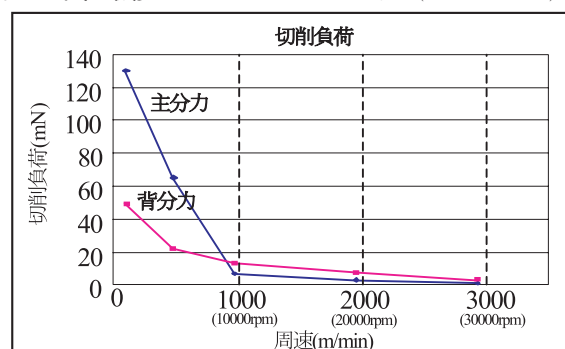


Fig.4 Cutting force

切削負荷低減により、回折格子加工の重要ポイントである工具先端の摩耗が1/10以下に改善した。Fig. 5にそれぞれ1000m切削後の工具摩耗比較を示す。左が通常条件、右が高周速条件である。

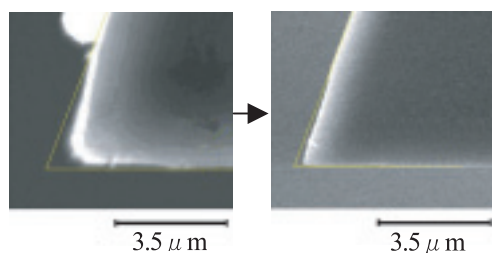


Fig.5 Cutting tool by SEM

3. 3 温度対策

3. 3. 1 加工機温度安定化

開発コンセプトの一つである高速加工の大きな狙いは温度変化等の外乱誤差要因を受けにくくすることにある。

しかし短時間でも、加工機自体の発熱や周囲温度の影響により工具・ワーク間隔が微妙に変動し誤差となる。

走査レンズ金型をフライカットする場合、Fig. 6 に示すように時間経過の中で発生する加工機の温度変化がピックフィード方向に転写され、加工誤差となる。

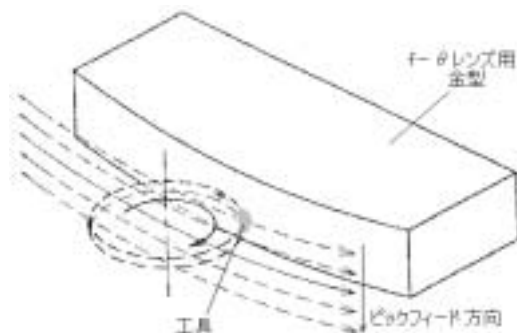


Fig.6 Fly cutting method

そこで、加工機全体を断熱カバーで覆い、室内空調のバランスを整えた。その結果、Fig. 7 に示すように加工雰囲気温度のうねりも0.02℃程度となった。

その他、油静圧案内に供給する油やスピンドル冷却用の冷却水の温度うねりを0.01℃に低減する対策を実施し加工機自体の温度安定化を図った。

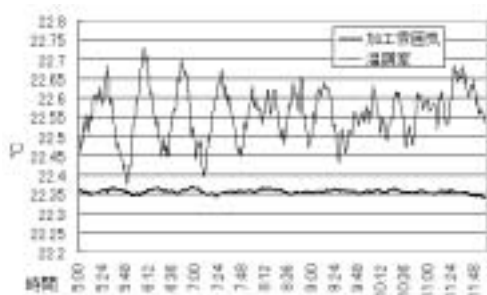


Fig.7 Temperature

3. 3. 2 温度補正システム

温度対策を実施し、さらに高速加工を実現することで温度変化の影響を受けにくくなっているが、目標とする

形状精度50nmに対しては不十分であり、温度変化の影響をキャンセルする温度補正システムの開発を行った。

加工機の構造及び実測結果の解析から、温度モニターポイントを選定し、そのポイントの加工時の温度変化量を工具・ワーク間の距離変動に換算し、切込み軸であるZスライドの駆動量を補正するシステムである。毎回異なる温度状況に対応したリアルタイムの補正であり、Fig. 8 に示すようにZ軸のフィードバックスケールのヘッドを外部から微動することで補正しているので、NCによる制御系に影響を与えない。つまり、加工データを変更する事無く通常通りの加工形態の中で温度補正が可能である。

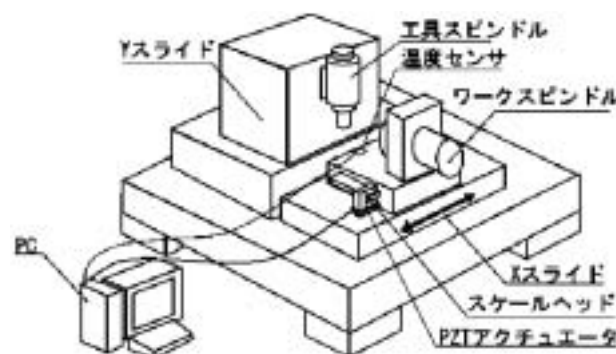


Fig.8 System configuration

Fig. 9 に温度補正の有無によるピックフィード方向の形状誤差と、その間の補正ポイント温度変化を示す。

温度補正により50nm以下の加工が可能となっている。

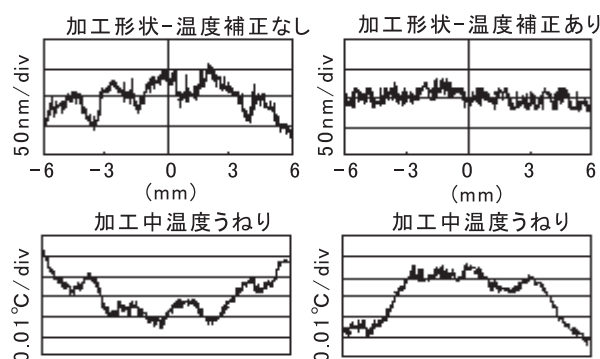


Fig.9 Cutting form and temperature

4 加工実例

4. 1 走査レンズ

最近の加工実例をいくつか紹介する。まずは、デジタルフルカラー複写機「8050」に使用されている長尺走査レンズ（加工範囲202×11mm）の加工結果で、通常的自由曲面フライカットを行った。Fig.10は有効域全域のプロフィール測定結果を基に、独自の光学性能解析ツールを用い、加工誤差の光学性能への影響を解析した結果である。光学仕様の1/10以下の良好な結果が得られた。

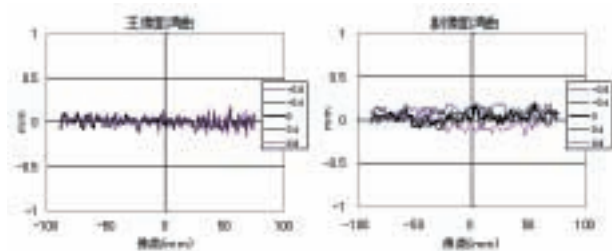


Fig.10 Curvature of image

4. 2 DOE コリメータ素子

DOEコリメータ素子は、レーザー走査光学系の光源部に使用するコリメータとシリンドラを一体化した複合素子である。Fig.11に各光学面の構成を示す。

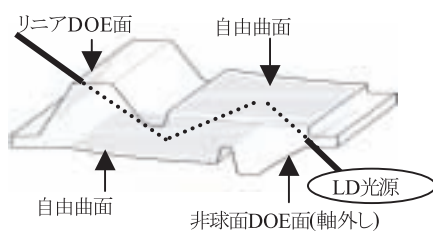


Fig.11 DOE Collimator

自由曲面、リニアDOE面は走査レンズと同様のフライカット加工を行った。非球面DOE面は、軸外しの非球面上に4~30 μm の回折ブレードを配した光学面であり、ワークだけでなく、工具も数万rpmで回転させることで工具摩耗を抑え鏡面を確保している。Fig.12に非球面DOE加工形態を示す。Fig.13に非球面DOEのSEM写真を示す。工具摩耗はほとんど無く良好な加工結果となった。

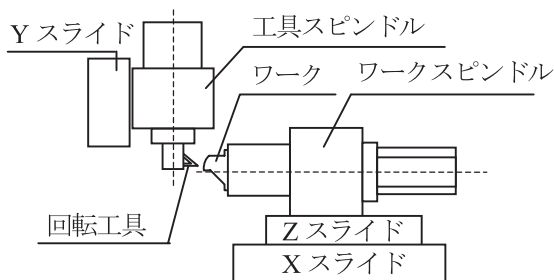


Fig.12 System configuration

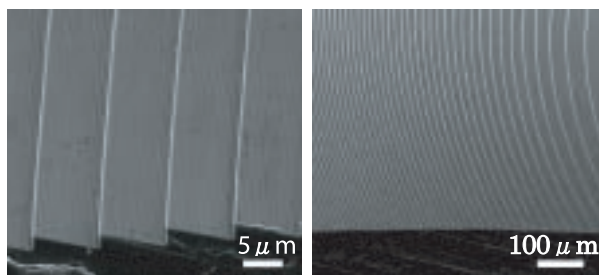


Fig.13 Diffraction grating pattern by SEM

4. 3 軸対称バイナリ素子

情報機器以外の最新加工例として2例紹介する。

軸対称バイナリ素子は隣接段差1 μm 程度の階段形状を有する。順次ピッチは変化し最小幅は10 μm である。形状精度は50nm以下。Fig.14に走査型干渉計評価結果を示す。

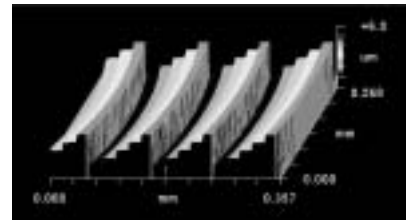


Fig.14 Profile by Interferometer

4. 4 微小自由曲面素子

鞍型の微小自由曲面加工例を示す。最大傾斜角度は30°で有効範囲は0.2mm×0.4mm弱。Fig.15に形状概略図を示す。Fig.16に形状測定結果を示す。本加工は工具を固定したシェーパ方式にて行い、傾斜部の加工特性による誤差を補正することで、50nmの形状精度が得られた。

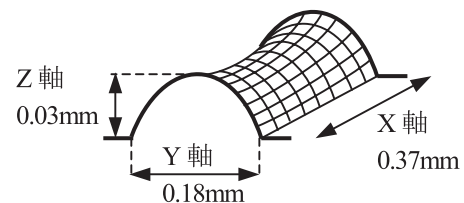


Fig.15 Minute free-form

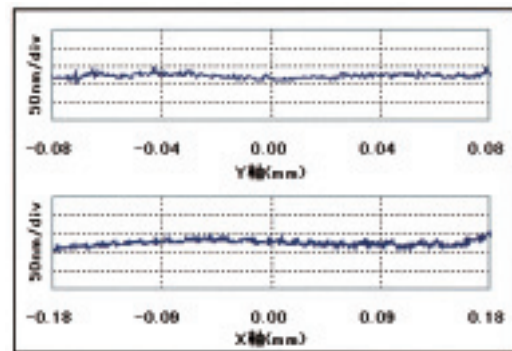


Fig.16 Profile

5 おわりに

本開発の目標である形状精度50nm・鏡面確保ともには達成できているが、現在も更なる面粗度向上、高速高精度加工に向け取り組み中である。今後は、加工対象領域を拡大し、新規光学デバイス開発に貢献して行きたい。

最後に、本開発に協力していただいた関係者各位に深く感謝し、お礼を申し上げます。