

超精密自由曲面加工機 ASP20

Non-axisymmetric Aspheric Generator

キーワード

自由曲面、 $f-\theta$ レンズ、光学部品、静圧軸受、静圧ねじ、オンマシン計測、補正加工、非球面

精機製造所技術部

清水龍人

技術開発部加工技術部

上 芳啓

1. はじめに

近年、カメラ、ビデオなどの光学機器は消費者の使いやすさを狙いとした小型、軽量、高性能化が進んでおり、これを支えるキーテクノロジーの1つに非球面光学部品による光学系のコンパクト化がある。当初はカメラレンズやコンパクトディスクのピックアップレンズに代表される軸対称形状の光学系に非球面形状が採用され、当社においても1988年より、軸対称非球面加工機を商品化し高い評価を得ている。しかし最近では図1に示したレーザビームプリンタの $f-\theta$ レンズに代表される非軸対称形状の光学部品に対しても非球面化の要求が高まってきている。

これらの光学系に要求される加工精度はサブミクロンさらにはナノメータのオーダーに入ってきており、非球面光学系を加工する機械は非常に高い運動精度が要求される。本稿ではこの要求に応えるために開発した自由曲面加工機(図2)について紹介する。

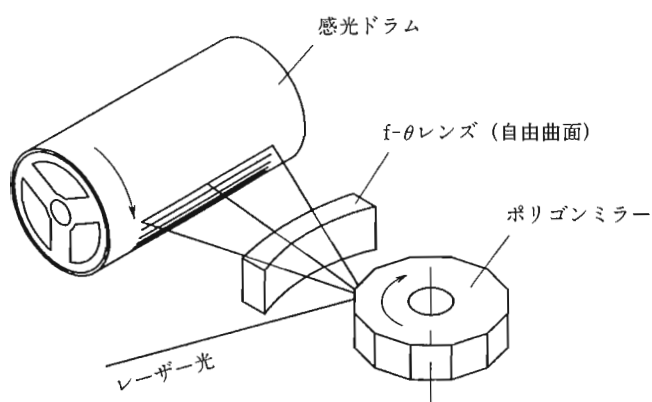


図1 レーザビームプリンタの光学系

2. 自由曲面加工機の概要

一般に自由曲面とはランダムな3次元形状を示すが、本機で加工対象としている光学的な自由曲面はツェルニケの非球面式で表される狭義の自由曲面である。図3に代表的な光学的自由曲面のワーク形状の模式図を示す。頂点を含む長手方向の断面(XZ平面に平行な断面)を主断面、短手方向の断面(YZ平面に平行な断面)を副断面と呼ぶことにする。例えば主断面、副断面の表面形状が共に円弧であり、それぞれの曲率半径 $R1$ と $R2$ が等しければ球面、 $R1 \neq R2$ であれば一般にトーリック面と呼ばれる形状となる。球面に関しては、球面創成原理を利用し回転ワークにカップ

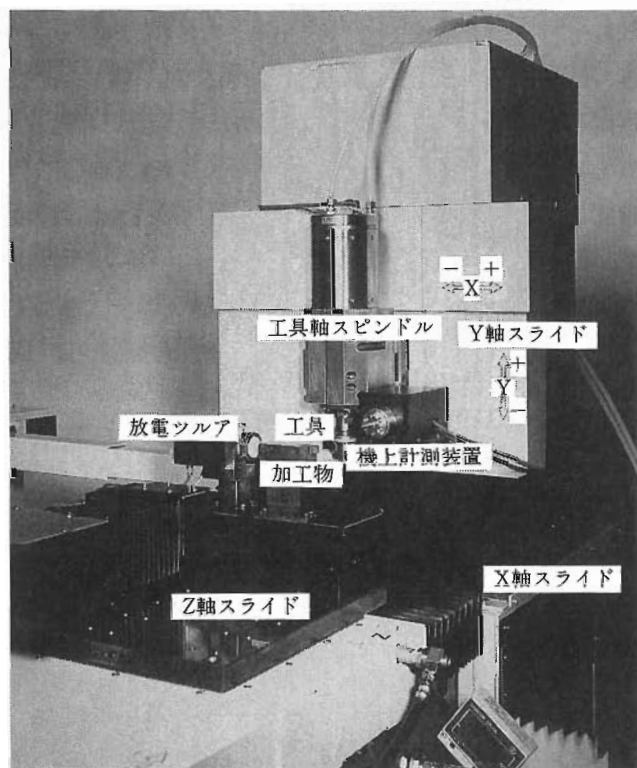


図2 自由曲面加工機

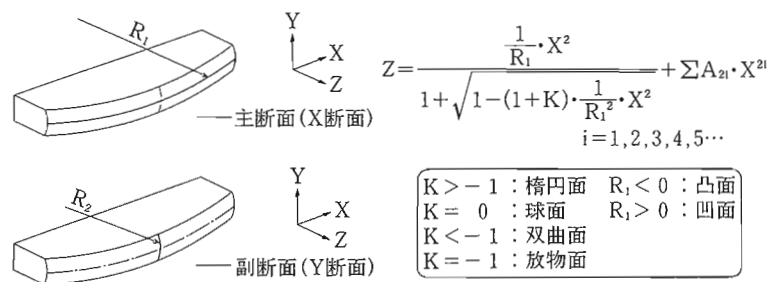


図3 代表的な自由曲面ワーク例

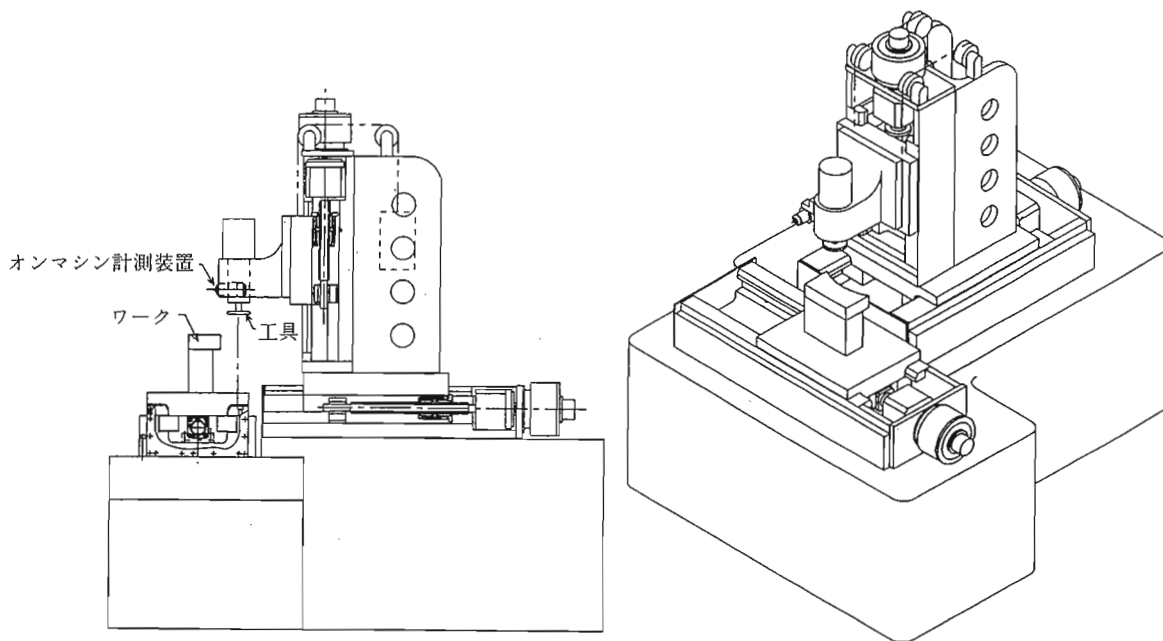


図4 自由曲面加工機の構成概略図

型砥石を傾けてプランジ研削する方法で量産が可能となっており、トーリック面に関するいくつかの創成方法が確立している。ところが自由曲面は、主断面と副断面の曲率半径が異なるだけでなく両方あるいは一方の断面の表面形状が多項式を含んだツェルニケの非球面式で表されるため有効な創成原理がなく、多軸の機械の運動軌跡を転写する以外有効な加工方法がないのが現状である。

図4にこのようなワークを加工するために開発した自由曲面加工機の概略図を示す。構成はXYZ3軸のスライドをそれぞれ直交配置とし、立軸スライド（Y軸）に工具スピンドルを搭載する構造としている。工具にはノーズRをもったバイトあるいは砥石を選択することにより切削・研削のどちらにも対応することが可能である。加工原理を示したものが図5であり、Y軸スライドは一定の割り出し位置決めのみを行い、工具高さ一定の条件のもとでX,Z軸スライドの相対運動によりワークの各高さでの曲線加工を行

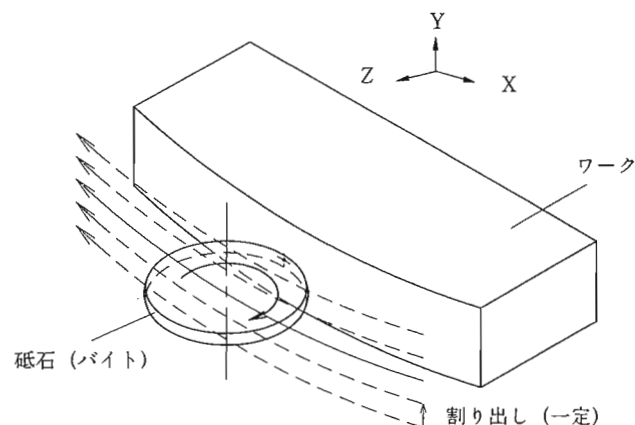


図5 自由曲面加工方法

う。このためワークの全面を加工するには、送りピッチと工具先端半径の関係で決まる理論面粗さを要求される粗さより小さくする必要があり、Y軸方向に数十回さらには

百回を越える割り出し回数が必要となる場合もある。
本機の最大の特長はスピンドルをはじめとし、スライドさらにはスライドを駆動する送りねじにいたるまで運動要素すべてに静圧軸受を採用していることである。静圧軸受は作動流体により可動部を浮上させた状態で支持するため非常に高精度で滑らかな動きを実現でき、さらに摩擦による劣化がないため半永久的にその精度を維持することができる。運動精度の再現性の点からみても、不可欠な要素といえる。工具スピンドルにはインダクションモータをビルトインした小型の高精度空気静圧スピンドルを採用している。また、直交3軸のスライドはすべて油静圧スライドを油静圧ねじで駆動する方式をとっている。油静圧ねじは送り方向以外に剛性を持たない特殊な構造としているため、一般に用いられるボールねじに比べて、送りねじの振れ回りによるテーブルの直進精度、姿勢精度への影響が極めて小さい。

3. パソコンリンクによるDNC運転

自由曲面加工機では加工面全体をカバーする大量の座標列を作成しなければならず、加工プログラムは数十万行にも達することもあり、容量としては数Mバイト以上が必要になる。したがって一般のNC装置では一つの加工プログラムでさえメモリに記憶することができないという問題が生じる。

本機では英国CT社製のフレキシブルNC装置(CPS3500)¹⁾を採用し、パソコンを接続したシステムで対応している。このNC装置はスライドの送り駆動用サーボモータへのアナログ指令電圧の分解能が高く、さらにフィードフォワード制御を行うことで追従誤差をきわめて小さくできるといった超精密加工に最適な特長をもつばかりでなく、トランスピュータリンクにより簡単にパソコンとの結合が可能となっている。パソコンのハードディスクドライブをNC装置のメモリと同等に利用できるため大容量の加工プログラムを幾つも保有することができる。また、加工は外部メモリからの点列データを高速に受け取りながら行うDNC運転が不可欠であるが、トランスピュータリンクとしたことにより通常パソコンとNC装置間のデータ転送に用いられるRS232Cによるシリアル通信に比べ約2000倍速いデータ通信ができるため、データ転送待ちによる軸移動停止の問題が全くない。

また、加工用NCプログラムは、パソコン上のソフトに形状を決定する係数、工具形状、ワーク寸法、加工条件を入力すれば座標列を計算しGコードを付加してハードディス

クに保存することができるため、NC装置からプログラムファイルを指定すれば即DNC運転による加工が可能となっている。

4. 加工プロセス

図5のような加工方法で加工した自由曲面ワークを考えた場合、機械に理想的な運動軌跡を描かせれば、主断面方向の形状精度は自動的に高くなる。しかし、副断面方向では、機械の運動精度だけでなく砥石の断面あるいはバイトの刃先形状の影響を受けるため、工具がいくら理想的な運動軌跡を描いて移動しても要求された形状精度が得にくいのがネックとなっている。光学部品に要求される精度は年々厳しくなっており、ほとんどの場合一度加工した形状を測定し、形状の崩れた分を修正する補正加工が必要となっている。

本機では運動精度とその再現性の高さを最大限に活かし、加工したワークのオンマシン計測、計測結果の解析、解析した形状精度をもとにした補正加工という加工プロセスを完成させ、加工精度の向上を図っている。

4.1 オンマシン計測

非球面形状を高精度に測定するためには、頂点の検出やアライメントといった極めて正確なワークのセッティングが必要であり、機外での測定ではこれを満足することは難しく、仮にできたとしても段取りにはかなりの時間を要する。また、一度ワークを取り外すと元の状態に戻すことは困難であり、ワーク再取り付け後粗加工もしくは中加工が必要となってくる。この点オンマシンでの計測は加工したワークをそのままの状態でも測定できるため、アライメントの必要がなく短時間で最も正確な測定が可能となる。さらに前回の加工座標をそのまま利用することで、補正加工にスムーズに移行できるメリットがある。

0.1 μ mの加工精度が要求される自由曲面加工機において、

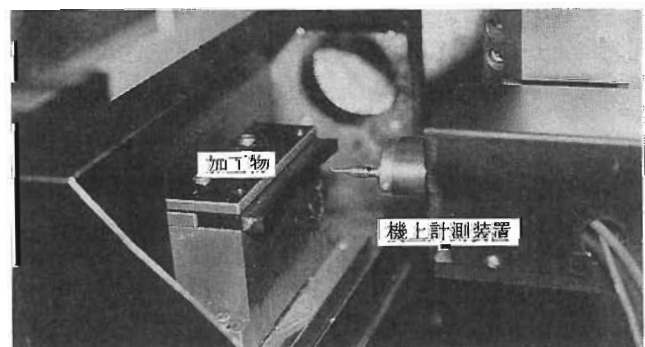


図6 機上計測装置

オンマシン計測用として搭載する計測機はそれ以上の測定精度が要求される。図6に今回開発したオンマシン計測装置の外観図を示す。測定は接触式で行い、先端にφ2mmの高精度ルビー球を付けたプローブが前後にスライドするようになっている。プローブ案内内部には超小型空気静圧スライドを採用しており、抵抗のない滑らかな動きを実現している。また、プローブの変位量は後端に取り付けたレーザスケールにより読みとっており、その分解能は0.01μmである。測定は加工機上であることを利用して測定点をX方向(あるいはY方向)に移動させながらプローブ検出値が一定となるようにZ方向のテーブルを移動する追従方式を採用しているため、プローブのストロークに依存しない測定が行える。近軸半径値や非球面係数で形状を測定前にあらかじめ規定しておく必要がなく、ワークの大きさのみ入力すれば測定が可能であるため、様々な非球面形状のワークに対応できる汎用性の高い測定システムといえる。

また、測定された各軸とプローブの位置データはNC装置とリンクしたパソコンのハードディスクドライブに保存される。実際に測定されるのは、ルビー球中心のXZ(あるいはYZ)の2次元座標値点列であり、ワーク表面形状は、ルビー球とワークの接触点を計算することで求めている。この場合ルビー球の形状精度自体が崩れていても、マスタ球の測定結果をもとに、その分の補正をすることも可能になっている。

4.2 非球面形状解析と補正加工

非球面形状は、基本となる円弧(楕円、放物線、双曲線を含む)に多項式で表せる曲線が重畳した形状であるため、簡単に評価することはできない。本機では、計測して求めた表面形状を理想非球面形状に対して形状のずれが最小になるようにフィッティングを行い形状誤差の表示ができる解析ソフトを開発した。

これによれば、理想形状からのずれの表示、あるいは最適近軸Rのフィッティングを行った形状からのずれの表示および工具径の読み違い量の解析が可能であり、目的に応じた使い分けができる。さらにその解析結果をもとに目標形状からのずれを小さくするための補正加工NCプログラムを作成するソフトも備えている。補正加工は、主断面および副断面の解析結果をもとに加工面全面の補正量を計算し補正加工NCプログラムに反映させる方式としているが、将来的には全面を計測した結果から補正が行えるようにする予定である。

一連のソフトを使用することで一次加工からきわめて短時間で補正加工への移行が可能であり、高精度の自由曲面加工システムとなっている。また、一次加工を行う理想NCプログラム作成から、形状測定データの保存、解析、補正加工NCプログラム作成、NCプログラムの編集まで全てNC装置とリンクしたパソコン上で行え、非常にコンパクトで効率の高いシステムといえる。

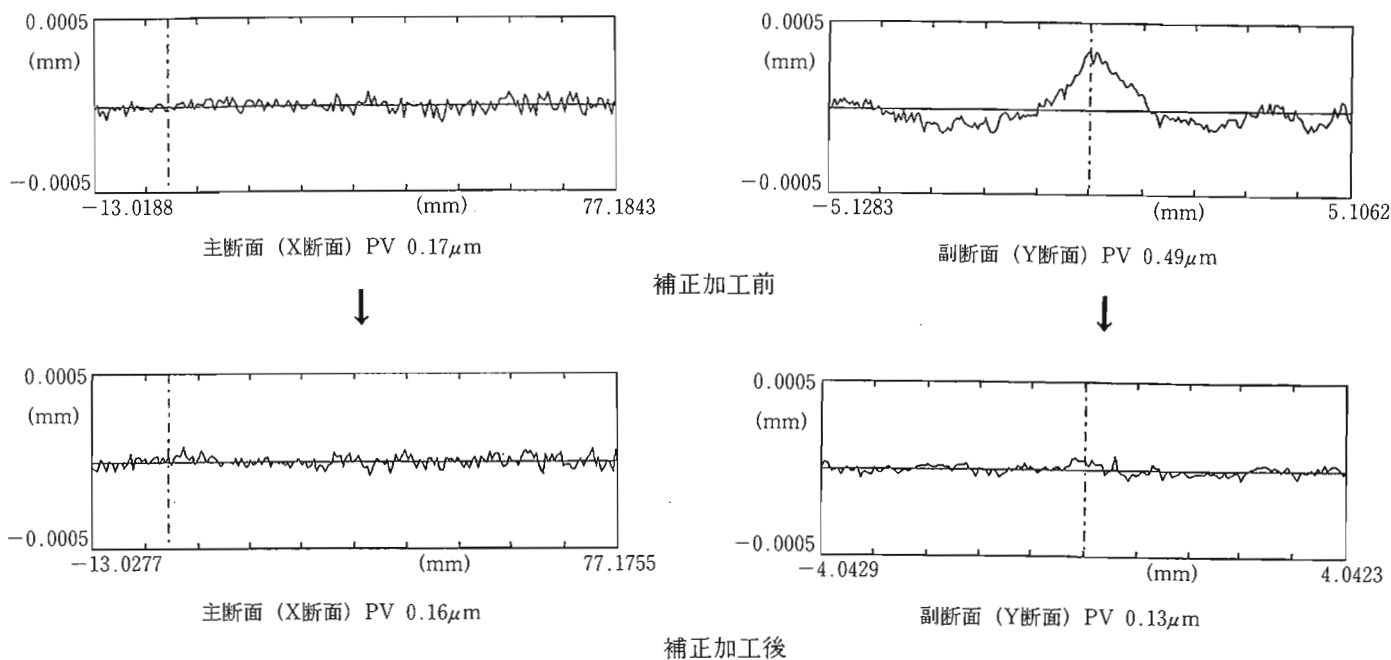


図7 自由曲面フライカット例
(加工物160×10無電解ニッケル面；主断面凹非球面，副断面凹球面)

5. 加工精度

加工例としてプロトタイプ機でトロイダルレンズ用金型をフライカットしたときの加工結果を図7に示す。加工面は無電解ニッケルメッキ面であり、工具には単結晶ダイヤモンドバイトを使用している。表示されている形状精度は、本機でオンマシン計測し解析ソフトで解析した主断面（X断面）および副断面（Y断面）の結果であり、目標形状からのずれ量を表している。約160×10のワークに対して、主断面では粗さ成分を入れても一次加工で0.17μm/90mmの形状精度が得られている。一方副断面ではバイト先端部の摩耗による形状劣化に起因する約0.5μmの顕著な形状崩れがみられる。副断面の解析結果をもとに行った補正加工後の結果をみると、粗さ成分を除けば約0.1μmの形状精度が得られており、機械運動精度とその再現性の高さを活かした補正加工システムがきわめて有効に働いていることが実証されている。

6. 機械仕様

自由曲面加工機の標準機の仕様を表1に示す。

7. おわりに

自由曲面加工機の紹介およびオンマシン計測と補正加工の必要性について述べた。年々高まる形状精度の要求は近い将来10nmレベルに達すると考えられ、これを実現するためにはオンマシン計測技術と高い運動再現性を持つ機械が必要である。加工と計測が一体となった超精密自由曲面加工機ASP20はこれをかなえる最先端超精密工作機械である。

参考文献

- 1) 伊豆 重行, 結城 由治, 土屋 秀雄; フレキシブルNC装置 CPS3500.不二越技報, Vol.51, No.1, p.38-43 (1995)

表1 自由曲面加工機の標準仕様

(1) 対象加工ワーク寸法 200 Wx 50 H	(8) ベース グラナイトベース 1800 x 1250 x 350 懸架方式 エアマウント
(2) X軸スライドテーブル (全油静圧軸受) ストローク 350 mm 最小設定単位 0.01 μm 送り速度 ~300 mm/min	(9) 機械本体の大きさ 幅 x 奥行き x 高さ 2200 x 1650 x 1800
(3) Z軸スライドテーブル (全油静圧軸受) ストローク 250 mm 最小設定単位 0.01 μm 送り速度 ~300 mm/min	(10) 重量 機械本体 6500 Kgf 電気制御盤 400 Kgf 静圧ユニット 450 Kgf クリーンエアユニット 40 Kgf 集塵機 80 Kgf
(4) Y軸スライドテーブル (全油静圧軸受) ストローク 100 mm 最小設定単位 0.01 μm 送り速度 ~300 mm/min	(11) 設置スペース (幅 x 奥行き) 4000 x 5000
(5) 工具スピンドル (エアスピンドル) 駆動方式 ビルトインモータ 回転数 6000~50000 rpm 砥石 (工具) 径 φ50 mm (標準)	(12) NC装置 (CPS 3500, CT社) 同時3軸制御, 直線補間, 円弧補間, 自動加減速 アブソリュート/インクリメンタル指令 MDI/CRTユニット, リファレンス復帰, 手動パルス発生器 (1個), JOG, ユーザマクロ
(7) オンマシン計測装置 (エアライドプローブ) 計測可能ワークサイズ 200 Wx 50 H 検出分解能 0.01 μm	