

平成 21 年 5 月 28 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760092

研究課題名（和文）大型非球面金型の機上超精密形状計測法の開発

研究課題名（英文）Ultra-Precision Measurement System for Large Aspheric Molding Die

研究代表者

曹 国輝 (CAO GUOHUI)

中部大学・先進計測研究センター・研究員

研究者番号：80424927

研究成果の概要：大型非球面金型(直径 300mm 及び 500mm、ミラー面の長さ 400mm の放物面と双曲面からなる)を超精密ダイヤモンド切削し、その形状を機上の変位センサーで測定し、補正加工した。その結果、形状精度 $\pm 92\text{nm}$ を得た。円筒の場合、形状精度 $\pm 54\text{nm}$ を得た。上記の形状計測実験を通じて、機上超精密非球面形状計測法を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	0	1,400,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	360,000	2,960,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：超精密加工

1. 研究開始当初の背景

宇宙 X 線の謎を解明するためには宇宙に衛星を送ることが必要である。リック・ジャコニ博士(2002 年物理学ノーベル賞受賞)は、世界初の X 線衛星であるアインシュタイン X 線望遠鏡を開発した。1978 年には、より正確な宇宙 X 線画像が、この探知器によって宇宙 X 線研究史上初めて撮影された。現在、宇宙では、この望遠鏡を利用して撮影している衛星が 3 機ある。最高精度で撮像可能な米国のチャンドラ衛星(1999 年)、最高域の光を集める EU の XMM-ニュートン衛星(1999 年)、そして、最も優れた分光特性を有する日本のすざく(2005 年)である。

それらは、全て高品質で大口径のマンドレル、またはナノメートルスケールの高精度非球面表面加工による X 線望遠鏡を搭載している。将来的にそれらは、硬 X 線望遠鏡(HXT)に対し、表面粗さ $<0.3\text{nm rms}$ と幾何学的形状誤差 $<100\text{nm}$ の性能を満たす必要がある。しかし、問題となる点は、金型が大口径であるために NC 制御による一度の旋削送りでは正確に機械加工できないため、旋削加工後に加工機上で非球面金型の形状精度を測定しなければならないことである。加工した金型はオフラインでは測定できず、工作物の固定誤差のための NC プログラムによる補正を必要とする。そこで、金型の幾何学的誤差を測

定するための超精密測定システムを開発することが非常に重要となる。

2. 研究の目的

この研究の目的は、大径の非球面金型を超精密に測定するシステムを開発することである。それには、超精密工作機械の運動誤差測定を考慮して加工機上で非球面金型の形状を測定する方法を開発すること。さらに、非球面形状を加工するための最適な工具経路のパラメータを検討することが含まれている。

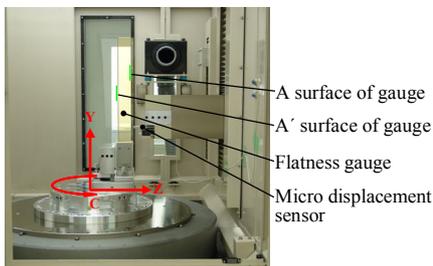
3. 研究の方法

位置測定システムの構築

測定の環境。信頼性のある正確な測定データを得るためには、測定実験を実施するのに適した環境が必要である。したがって、超精密加工機は $23 \pm 0.1^\circ\text{C}$ で温度を一定に保持しているクリーンルーム内に、さらには空気基礎による耐振装置上に設置されている(図1参照)。機械加工機の主軸の振れは $\pm 7\text{nm}$ 以内で制御され、加工機の運動最小刻みは 1nm である。工作機械の正確な軸の動きは図1で確認できる。真直度の誤差測定は、超平滑なガラスセラミックの偏平ゲージおよび 2nm の分解能を有する非接触マイクロ変位計によって行われる。



(a) 恒温クリーンルーム



(b) 運動の軸の定義

図1 測定システムの環境

測定システムの概要。測定システムの概要は図2に示される。測定システムは、DNCモードにおいて、測定過程を制御するためにNC測定プログラムを高速直列バス(HSSB)を通して加工機のコマンドスタックに送信す

る。マイクロ変位計で測定された座標値データは、測定器の動作と同時に、リアルタイムで産業用コンピュータのメモリとハードディスクに反映される。しかし、測定データは非常に多くなるために、高速デジタル入出力インターフェースボードが、 20MHz のサンプル周期でデジタル位置信号を保存するために使われ、さらに、高精度16ビットADボードは、センサからデータを取得するために使用される。

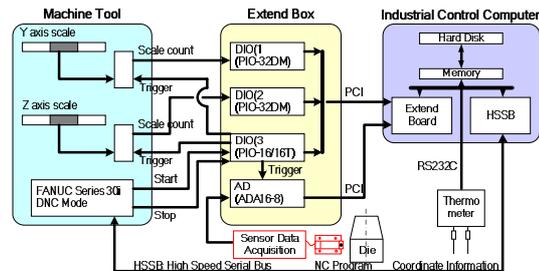


図2 測定システム

真直度誤差補償のための実験

真直度誤差の計算方法。偏平ゲージの表面を測定するために直線動作によるNCプログラムを使用すると、センサデータからオリジナル曲線を得ることができる。しかし、その曲線は、主に加工機の運動に依存する真直度誤差とゲージが有する形状的誤差の2つ要素から構成されている。また、ゲージの表面に対してセンサヘッドを垂直に設置するのは非常に困難である。したがって、工作機械の正確な真直度誤差を得るためには、ゲージが有する形状的誤差をオリジナル曲線から除去することが必要である。真直度誤差は、軸に対して直線運動との間で生じる最小の変位誤差と定義されます。したがって、真直度誤差は、得られた測定データから次の公式のように算出される。その公式は、最小二乗法に非常に影響する。ポイント (x_i, y_i) は、センサからのオリジナル曲線に関するデータであり、データポイントの数値である。m はデータポイントの数値番号です。n は多項式の整理番号で、 a_k は多項式係数である。

$$I = \sum_{i=0}^m [p_n(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=0}^m \left(\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=0}^m \left(\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i \right) x_i^j = 0 \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

偏平ゲージの輪郭図。図1(b)に示す図に、A、およびA'の表面として測定過程で使用される偏平ゲージの2つの表面がある。ゲージ表面の輪郭形状は、Zygo GPIによって計測される。ゲージA基準ピッチ面中心部の輪郭形状は、図3に示されるように最大で $\pm 7\text{nm}$ である(図

3参照)。400mmの長さにおける輪郭形状曲線は、それを50 μm のNCプログラムステップに比例させるために線形補間法によって8000の点まで拡大させることが可能である離散的な200の点で表される。

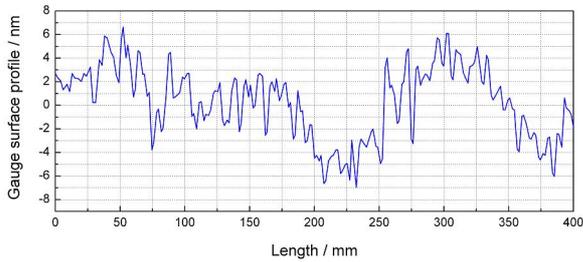
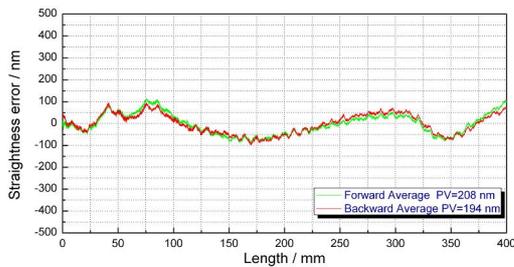
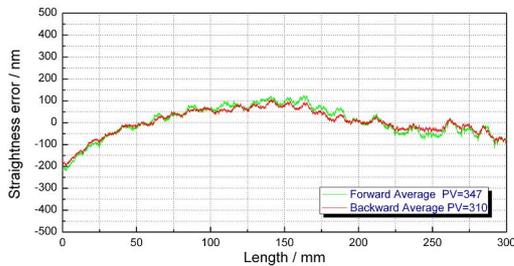


図3 ゲージの輪郭図

加工機の真直度誤差。真直度誤差は、上記の測定システムと計算方法を使用することで測定される。測定の過程において、偏平ゲージのA表面プロフィールは対応するポイントのデータから除外され、ゲージの傾斜角とゲージ表面輪郭形状の最大値が非常に少ないことから、ゲージの表面の傾斜誤差は無視することができる。図4(a)は、加工機のY軸前後両方向の真直度誤差を表す。各値は5回の測定後の平均値である。前後両方向へのY軸の真直度誤差は、それぞれ400mmのストロークに対して208nmと194nmである。同様の実験を加工機のZ軸で行なうが、加工機のZ軸の移動量の制限上、測定範囲を300mmとした。前後両方向へのZ軸の真直度誤差は、300mmのストロークに対して、それぞれ347nmおよび310nmである(図4(b)参照)。



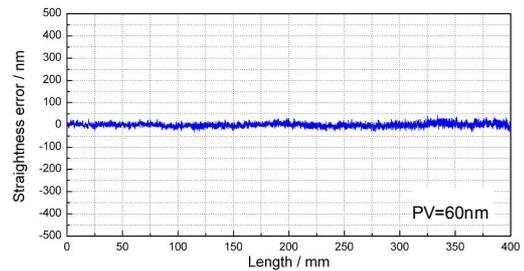
(a) Y軸真直度



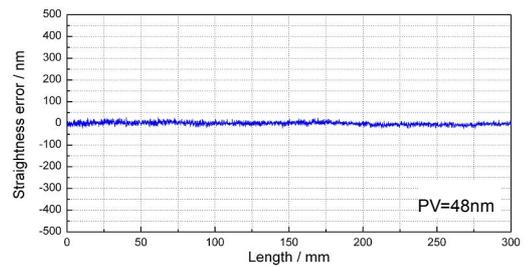
(b) Z軸真直度

図4 加工機の真直度誤差

真直度誤差補正。2種類の新しいNCプログラムは、Y軸およびZ軸上の直度誤差補正を基に作成された。NCプログラムコードは、直線コマンドではない。NCプログラムにおけるポイント値は、真直度誤差曲線のポイント値に対して逆値であり、加工機軸の動的誤差を補正している。偏平ゲージのA表面を基準として、真直度誤差は補正後に再び新しいNCプログラムによって測定される。同様の測定プロセスを得て、偏平ゲージのA'表面輪郭形状は対応するポイントの元データから考慮される。真直度誤差補正の結果は図5に示される。Y軸およびZ軸の真直度誤差補正は、400mmに対して60nm、300mmに対して48nmである。



(a) Y軸真直度



(b) Z軸真直度

図5 補正後加工機の真直度誤差

非球面マンドレルの測定基準ポイント

X線望遠鏡鏡は、双曲面と放物面の複数の入射反射鏡から構成されている。反射鏡を製作するためには、マンドレルを機械加工する必要がある。ナノメートルの精度で大型超精密非球面マンドレルを測定するためには、複製された反射鏡の加工が不可欠であり、測定分野における課題となる。測定の際には、形状誤差を補正するための測定基準点として設計段階で計算された理論形状の輪郭点が、2つの非球面の交差点(青い点)に示される(図6)。その際、双曲線と放物線が交差する点付近では、直線に沿ったセンサによってスキャンされる。測定結果(青い線)の4点(緑の点)は、2つの線を作成するためのものである(赤い線)。両線の交差点の先(赤い点)は、測定基準点として測定方向に認識された。実際には、2度の焦点法により、精度の高い基準点位置

として測定結果を得ることができた。

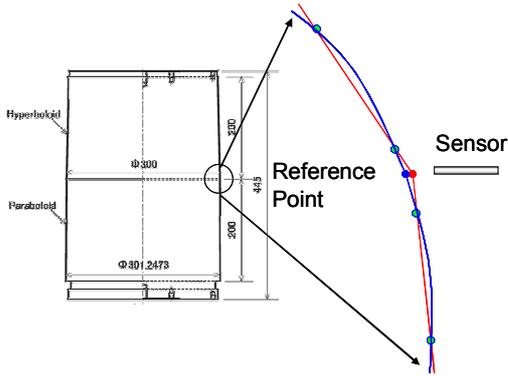


図6 非球面マンドレルの測定基準ポイント

4. 研究成果 大型光学素子の測定

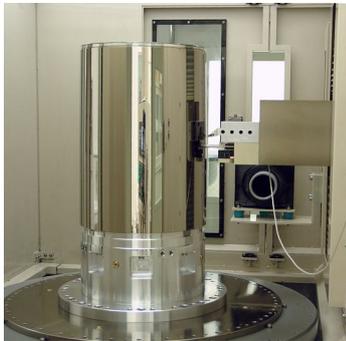


図7 大型光学素子測定中写真

本研究における当初の実験では、長さ400mm、直径300mmである鏡面のアルミニウム円筒マンドレルを加工し、加工機上において測定した。幾何学上形状誤差は、400mmの測定領域で $\pm 54\text{nm}$ の範囲であった。次に、非球面のマンドレルを同様に加工して測定を行なった結果、400mmの測定範囲において幾何学上形状誤差は $\pm 92\text{nm}$ 以下となった。本研究における測定システムが、非球面光学測定において有効に活用されたことが図7と図8に示されている。青い線は、従来の機械加工による結果であり、赤い線が補正後の形状誤差を示している。

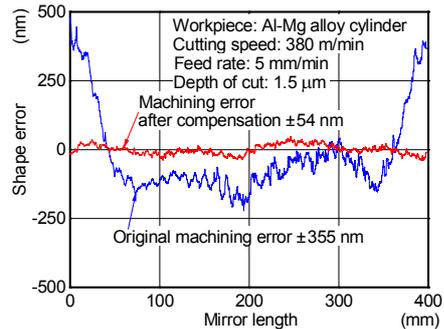
大型超精密ダイヤモンド旋削は、高精度次世代硬X線望遠鏡鏡開発の過程で、機械を研磨測定するために設計、製作されたものである。本研究では、同機械を大径アルミニウム工作物の加工に使用した。従来の大型光学機器の真直度誤差補正および大型光学機器の形状測定における上記の基本的な実験調査結果から以下の結論が得られた。

(1) 測定システムは、サブミクロン精度の

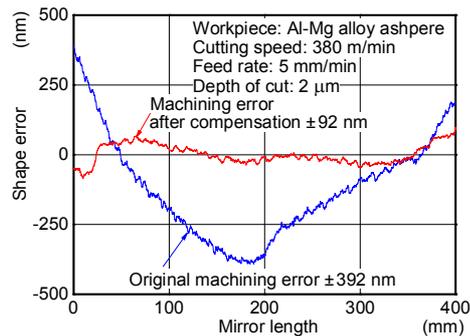
非球面形状測定においては先進的であり有用である。

(2) 補正後の加工機2軸の真直度誤差は、Y軸で400mmのストロークに対して最大60nm、Z軸で400mmのストロークに対して最大48nmである。

(3) 直径300mm、長さ400mmの鏡面を有するアルミニウム円筒金型と非球面金型は、測定後に形状誤差を補正し再加工を行なった。その結果、形状誤差は、400mmの測定範囲で円筒金型で $\pm 54\text{nm}$ 以下、非球面金型で $\pm 92\text{nm}$ 以下となった。



(a) 円筒面光学素子



(b) 非球面光学素子

図8 大型光学素子測定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Guohui Cao, Yoshiharu Namba, Straightness Error Compensation for Ultra-Precision Machining Based on a Straightness Gauge, Key Engineering Materials, Vol.381-382, 105-108, (2008), 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① Guohui Cao, Yoshiharu Namba, Straightness Error Compensation for Ultra-Precision Machining Based on a Straightness Gauge, 8th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent

Instruments, Sept. 25th, 2007, Tohoku Univ., Sendai, Japan.

- ② 曹国輝, 難波義治, 非球面光学素子の形状計測, 2008 秋季第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月 4 日, 中部大学, 春日井市, 日本
- ③ 曹国輝, 難波義治, 誤差補正による非球面光学素子の超精密形状計測, 日本機械学会第 7 回生産加工・工作機械部門講演会, 2008 年 11 月 21 日, 長良川国際会議場, 岐阜, 日本
- ④ Guohui Cao, Yoshiharu Namba, Precision Shape Measurement of Large Aspheric Optics Based on Error Compensation, The 6th CHINA-JAPAN International Conference on Ultra-Precision Machining (CJICUPM2008), Nov. 24th, 2008, Hunan Univ., China

6. 研究組織

(1) 研究代表者

曹 国輝 (CAO GUOHUI)

中部大学・先進計測研究センター・研究員

研究者番号 : 80424927