

	あらいよしかず	
氏名	荒井義和	
授与学位	博士(工学)	
学位授与年月日	平成17年3月25日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 機械電子工学専攻	
学位論文題目	非球面形状のナノ計測に関する研究	
指導教員	東北大学教授 清野 慧	
論文審査委員	主査 東北大学教授 清野 慧	東北大学教授 厨川 常元
	東北大学教授 長南 征二	東北大学助教授 高 偉

論文内容要旨

高精度な基準を得ることが困難なナノ計測の分野においてハードウェアによる精度限界を超えるためソフトウェアデータムの手法が有効であり、様々な測定対象に対して応用されている。本論文は従来の手法を直接適用することが難しい非球面形状測定に対して走査型測定における測定プローブ及び走査基準の高精度化を実現する運動誤差分離測定システムを提案し、具現化するための研究をまとめたものである。

第1章 緒論

球面収差がないため像が明るく、少ない枚数で光学系を構成できる非球面レンズに代表される非球面形状は各分野で利用価値が高いがその性能を十分に発揮するために要求される形状精度が極めて高い。加工機だけではこのような超高精度を出すことは難しいが、机上測定ができれば得られた結果を加工にフィードバックすることにより必要な精度を出すことができる。そのため、形状測定技術はナノテクノロジーの分野において非球面形状などの精密な部品の開発と生産のキーとなる技術である。

様々な非球面形状測定法が研究開発されているが、本研究では自由度が高く、対環境性に優れた点走査型の接触式プローブを用いた非球面形状測定法をとりあげ、高精度な計測法の確立を目指す。この方法においても解決しなければならない次のような問題点が存在する。まず、点走査法のような走査型測定を行う場合、ステージの案内が測定の走査基準となる。そのためステージの運動誤差が被測定表面の形状に混じって測定データに含まれてしまう。このような走査基準の運動誤差が問題となる。また、接触式プローブにより被測定表面を測定する場合、測定プローブの先端形状誤差が問題となる。通常、測定プローブの先端形状には球形状が多く用いられており、球の各接触点における出力の半径補正を施しているが、出力にはさらに先端球の真球度からのずれ、つまり先端球の形状誤差が含まれている。通常、基準球などを用いてプローブ先端球の形状誤差校正を行うが、この場合でも基準球の持つ形状誤差が出力に含まれてしまう。さらにいずれのプローブを用いる場合でも出力の線形誤差に注意を払う必要がある。一般にこうした出力の誤差は上位の測定機によって校正されているが、システムに組み込む時に校正曲線が変化する恐れがある。このような母性原理に支配されたハードウェアによる精度限界を超えるためソフトウェアデータムによるナノ計測技術の開発が必要不可欠である。

第2章 自律校正法による変位センサ出力の高精度化

非球面形状のナノ計測を実現するための運動誤差分離測定システムを提案し、システムにおいて用いられる非球面形状用と運動誤差測定用のセンサ出力の校正を行った。非球面形状を測定する際に走査型測定においては走査基準となるステージの運動誤差がプローブ出力に含まれてしまう。こうした運動誤差の影響を受けずに非球面形状を測定するために平面補助試料を用いてステージの運動誤差を分離測定するシステムを考案した。プローブのセッティング誤差などを考慮し、運動誤差を精密に測定するため、従来、試料形状を精度よく求めるために用いられるソフトウェアデータムと呼ばれる手法を適応した。

非球面形状測定に用いる接触式変位計出力の線形誤差ならびに測定点での接触角に応じた平均感度誤差を明らかにし、接触角にして30度までの測定範囲4mm全域の校正曲線を得ることができた。さらに運動誤差測定に用いる静電容量型変位計の出力を校正するためプローブの取り付けや走査基準となるステージの運動誤差の影響を直接受けることなく、特別な外部基準を用いずにプローブの持つ分解能の限界まで校正誤差を測定できる2点法における走査型その場自律校正法を提案し(図1)、シミュレーションと実験により本手法の有効性を確認した。図2にそれぞれのプローブについて5回の収束演算により求めた校正曲線を示す。本実験では80 μm の測定範囲に対して線形誤差を0.01%まで校正することができた。

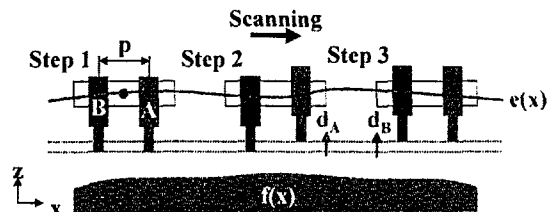


Fig. 1 Schematic of the scanning in situ self-calibration method

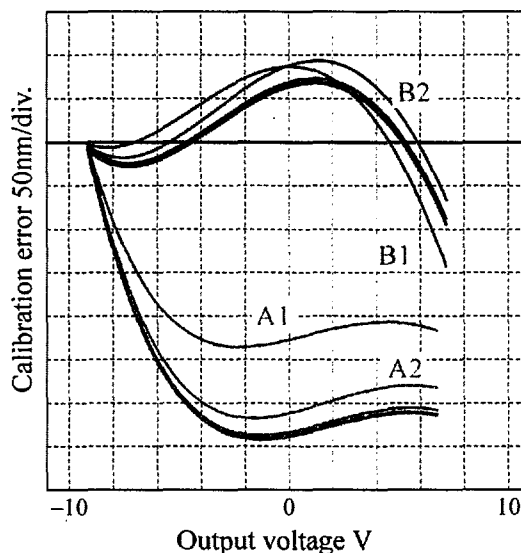


Fig. 2 Calibration error

第3章 自律校正法によるプローブ先端球形状の高精度化

測定プローブの高精度化を実現するために接触式プローブ先端球の形状誤差を分離測定する簡単な補正機構により構成されているため加工機上や測定機上への応用が容易な上、必要な頻度で校正を行うことができ、さらに特別高精度な基準球を用いない2つの自律的校正法を提案した。また、接触式プローブの先端球形状誤差を求めるために球誤差分離によるプローブ先端球形状誤差測定実験を行った。接触式のプローブを用いて非球面形状などの大きく傾斜角が変化する試料を測定した場合、プローブ先端球においても接触点が大きく変化するためプローブ先端球の形状誤差が問題となる。このようなプローブ先端球の形状誤差を補正するため、まず、プローブ出力に含まれる誤差について検討した。さらに試料球を用いたプローブ先端球形状誤差分離測定法を2つ考案した。1つは試料球を一定量回転させる前後のプローブ出力の差を取ることでプローブ先端球と試料球の形状誤差を分離測定できる方法で、もう1つは試料球を回転させることにより仮想的な真円を創り出し、その試料球を測定することによりプローブ先端球の形状誤差を求める方法である。

プローブ先端球の形状誤差を分離するために試料球を回転させることによって形状の位相をずらし、回転前後の差動出力をとることによってプローブ先端球と試料球の形状誤差を分離測定できる方法を用いて実験を行った。その結果、試料球の形状誤差の繰り返し誤差は13nm、プローブ先端球の形状誤差の繰り返し誤差は100nm程度となり、いずれも接

触式プローブの分解能および安定性を考慮すると測定限界に近い精度まで求められた。次にプローブ先端球と試料球のある接触点において試料球を回転させその n 回転分のプローブ出力を平均することにより試料球の形状および、回転軸の回転運動誤差の影響を受けずにその接触点におけるプローブ先端球の形状を測定できる方法により実験を行った (図3)。その結果、プローブ先端球の形状誤差の繰り返し誤差は 40nm 程度となり、本方法での接触式プローブの安定性による測定限界に近い精度で求められた (図4)。

第4章 自律校正法による走査基準の高精度化

運動誤差分離測定システムの走査基準の高精度化を目指して運動誤差分離の原理や実際のリニアステージに適用する際の留意点などを考慮した。また、駆動方式の異なる2つのリニアステージの運動誤差を測定し特性の違いや本手法の有効性を確認した。走査基準を構成する機械要素により分類し、その運動誤差の要因を考慮した。リニアステージの運動誤差を精密に評価するために合成法という精密測定法の原理に基づいて構築した測定システムを用いて、補助試料の形状及び走査ステージの運動誤差を測定し、その性能を確認した。

リニアモータ駆動空気案内ステージの報告が豊富な位置決め誤差を除いた多自由度誤差の各運動誤差を測定結果の信頼性を保証するため2種類の異なる測定機器で測定した。その結果からそれぞれの安定性、繰り返し性の中で良く一致し、信頼性の高い測定結果を得ることができた (図5、6)。また、ソフトウェアデータムの手法を適用した測定システムにより従来の測定機器と比べて標準偏差において真直度測定 54%、

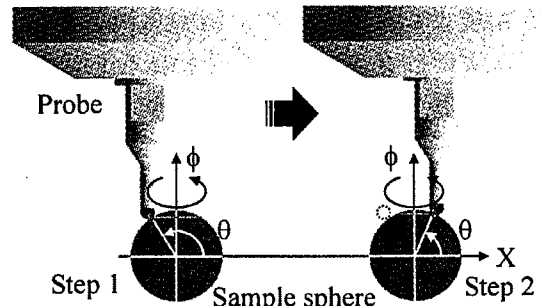


Fig. 3 Schematic of the method of averaging the sample sphere error

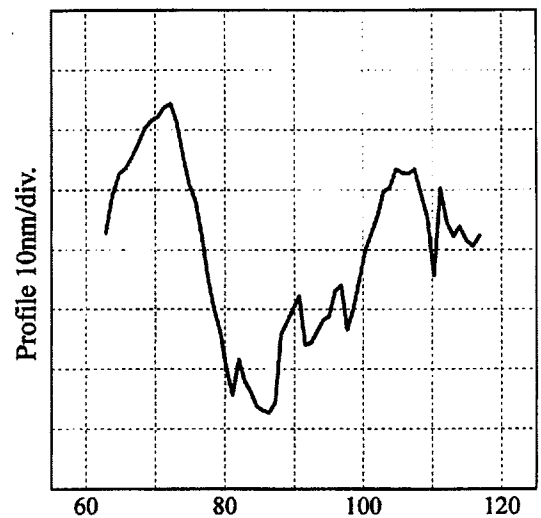


Fig. 4 Profile of probe sphere

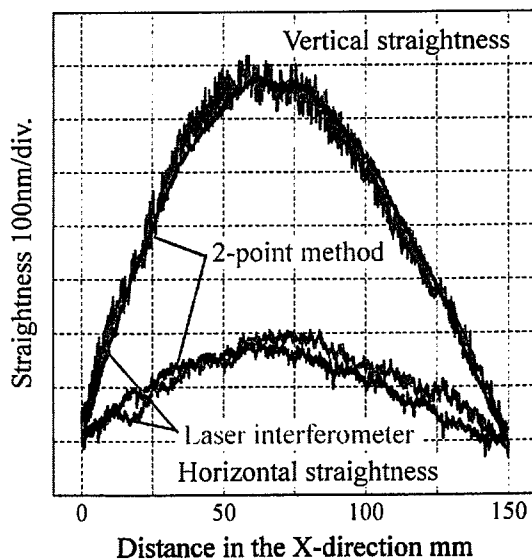


Fig. 5 Straightness error

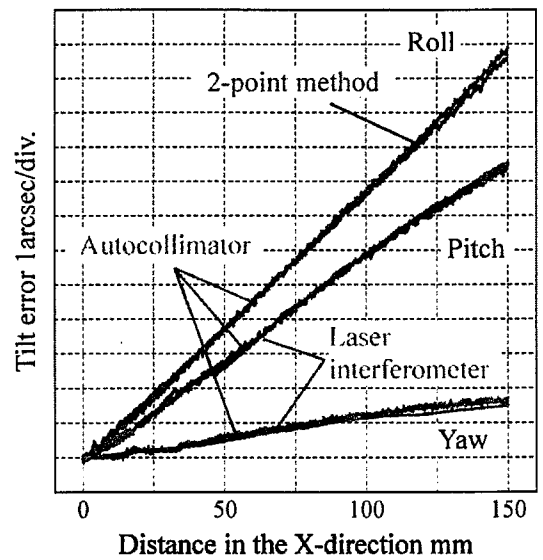


Fig. 6 Tilt error

ローリング測定 29%の向上が見られた。ボールねじ駆動すべり案内ステージを用いてボールねじピッチの影響を考察し、精度の異なる2種類の直定規を用いて実験を行った結果、繰り返し誤差において形状 15nm、水平真直度は直定規によらず同様な 250nm を得たことから、本手法は特別高精度な直定規を用いなくても形状誤差の影響を受けず高い精度でプローブ間隔よりも高周波成分を持つ運動誤差も測定できることが確認された。従って、その際の運動誤差を用いて走査基準の補正を行うことにより高い精度で運動誤差分離測定システム上の試料形状を測定することができる。

第5章 自律校正法による非球面形状のナノ計測

非球面形状のナノ計測を実現させるため加工機上に測定プローブの高精度化及び走査基準の高精度化を施した運動誤差分離システムを適用し非球面形状の測定を行った。加工機の水平真直度を高精度に測定するため走査基準の高精度化の手法を加工機スライドに適用し、また、加工点と測定点とのオフセットの影響をローリング測定により補正した。本手法を用いて2つの異なる駆動方式の加工機上において実験を行った結果、加工機の水平真直度を±10nmのオーダーで補正できることが確認された。

加工機上に構築した運動誤差分離測定システムを用いて非球面形状と水平真直度の同時測定実験(図7)を行った結果、運動誤差測定において高精度な補助試料を用いなくても変位計の安定性から求めた測定精度の限界まで補助試料の形状およびスライドの運動誤差を測定することができた。求められた運動誤差を用いて非球面形状を補正することにより、通常の加工機上測定では補正することのできない 60nm ある運動の繰り返し誤差の影響を取り除きながら高精度に非球面形状(図8)を測定できる。

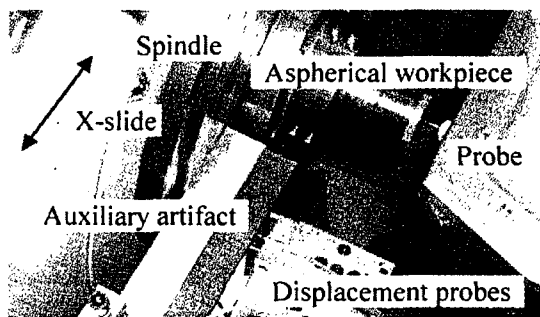


Fig. 7 Photograph of the on-machine measurement system

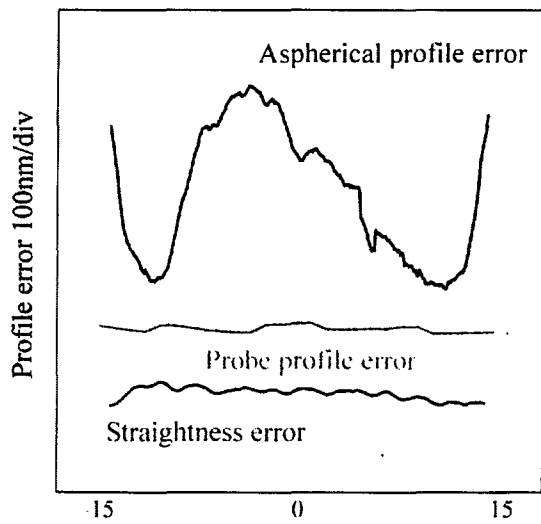


Fig. 8 Aspherical profile error

第6章 結論

本研究で得られた結果から本手法の有効性を各章ごとにまとめた。

以上、非球面形状のナノ計測を目的として測定プローブの高精度化および走査基準の高精度化を研究課題として掲げた。課題を乗り越えるための方法としてハードウェアによる精度限界を超えるための重要な鍵となるソフトウェアデータムの手法を応用した非球面形状と走査基準となるステージの運動誤差を分離測定するシステムを提案した。さらに運動誤差測定において特別な外部基準を用いずにセンサの持つ分解能の限界まで線形誤差を校正できる新しい自律校正法を開発した。また、非球面形状測定においても接触式プローブ先端球の形状誤差を分離測定するために、簡単な補正機構により構成され、必要な頻度で校正を行うことができる特別高精度な基準球を用いない自律校正法を提案した。以上の手法を用いて加工機上に適用し測定を行った結果、本手法の有効性が確認できた。

論文審査結果の要旨

高精度な基準を得ることが困難なナノ計測の分野においてハードウェアによる精度限界を超えるためソフトウェアデータムの手法が有効であり、様々な測定対象に対して応用されている。本論文は従来の手法を直接適用することが難しい非球面形状測定に対して走査型測定における測定プローブ及び走査基準の高精度化を実現する運動誤差分離測定システムを提案し、具現化するための研究をまとめたもので、全6章から構成されている。

第1章は緒論であり研究の背景と目的を述べている。

第2章では非球面形状とスライド運動誤差の分離測定システムの原理を述べており、また、システムにおいて使用される非球面形状用と運動誤差測定用センサの校正も検討している。特に2本の運動誤差測定用センサの校正には新たに特別高精度な基準を用いずにセンサの取り付けや走査基準の繰り返し誤差の影響を受けにくい2点法における走査型その場自律校正法を提案している。実験によりセンサの持つ分解能の限界まで校正できることが確認されており、理論的にも実用的にも価値が高い。

第3章では測定プローブの高精度化を実現するために接触式プローブ先端球の形状誤差を分離測定する方法を検討している。簡単な補正機構により構成されているため加工機上や測定機上への応用が容易な上、必要な頻度で校正を行うことができる2つの自律的校正法が提案されており、実験により接触式プローブの安定性による測定限界に近い精度で形状誤差が求められることを明らかにしている。これは実用上重要な成果である。

第4章では走査基準の高精度化を目指し、走査基準となるステージの運動誤差を分離測定する原理を説明している。2種類の異なる測定機器で位置決め誤差を除いた多自由度運動誤差測定を行うことにより測定結果の信頼性を保証している。また、基準となる特別高精度な直定規を用いなくても形状誤差の影響を受けず高い精度で運動誤差が測定できることが確認されている。これらは提案されているシステムの有効性を示す重要な結果であり、高く評価される。

第5章では第2～4章で行った実験を基に運動誤差分離測定システムを加工機上に適用した非球面形状測定について述べている。求められた運動誤差を用いて非球面形状を補正することにより、通常の加工機上測定では補正することのできない運動の繰り返し誤差の影響を取り除きながら高精度に非球面形状を測定できることを確認している。これは再度の加工へフィードバックする上でも有益な成果である。

第6章は結論である。

以上を要するに本論文は、従来高精度に測定することが困難であった非球面形状に対して、特別高精度な基準を用いずに自律的に測定する手法を開発し、加工機上への適用も実現したもので、精密測定分野に大きな影響を及ぼすことが期待でき、精密工学ひいては機械電子工学の発展に寄与するところが多い。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。