

レーザー測長誤差低減のための環境補正装置の開発

キーワード: レーザ干渉、測長誤差、環境補正、超精密加工、位置決め

はじめに

レーザー干渉測長器による測定は、超高精度といった大きな特長を有しますが、温度や気圧などの環境変化の影響を受けやすいことが知られています。これは、レーザー測長の基準となるレーザー光の波長が、大気中では空気の屈折率に依存して変化するからです。このため大気中の測定では何らかの対策を施さなければ測長誤差が生じます。

ここでは、このような測長誤差を低減するために開発した環境補正装置を超精密加工機に導入し、その有効性を評価した結果を基に解説します。

環境補正装置の構成

空気の屈折率は、環境の温度、湿度、気圧に依存して変化することが知られています。測長誤差の発生原因は、環境変化にともない空気屈折率が変化しても、屈折率の値を固定値として長さを算出するからです¹⁾。そこで、刻々と変化する環境データを計測し、その時点での空気屈折率を測長に反映させることにより、レーザー測長誤差を低減する環境補正装置を開発しました。図1に装置のシステム構成を示します。ここでは、超精密加工機（豊田工機製 AHN60-3D）の位置決め機構に導入しました。

温・湿度計(①)と気圧計(②)は、加工機を覆うエンクロージャの内側に設置され、レーザー光路近傍での温度、湿度、気圧を計測します。計測された環境データは、一定周期の安定した転送を目的に設置したデータ収集ボード(③)を経由してPCベースの解析装置(④)に送られます。解析装置は、環境の計測データから正確な空気屈折率をリアルタイムに算出し、その値をレーザー測長器(Zygo製 ZMI-1000)内に新たに追加した環境補正ボード(⑤)へ出力します。補正ボードは、リアルタイムに更新される空気屈折率を用いて、レーザー測長器から出力される生の積算値を補正し、その補正値を標準状態(温度 20℃, 湿度 50%, 気圧 1013.25hPa)における積算値に換算して加工機 CNC 装置(⑥)に送ります。

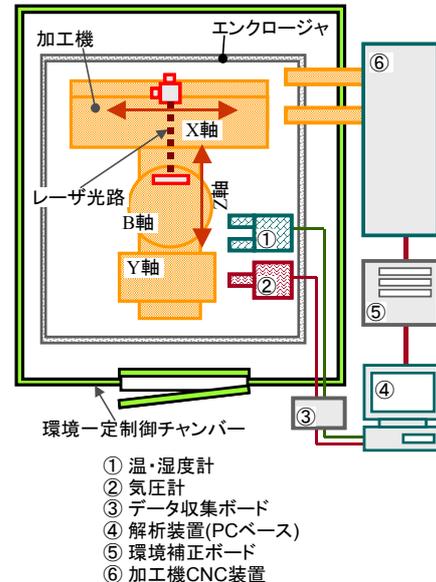


図1 環境補正装置のシステム構成

デッドパス長さの推定

さらに、高精度な測長の実現には、いわゆるデッドパス(測長系の原点とレーザー干渉における光路差ゼロ地点の間)の長さに対しても補正が必要となります¹⁾。レーザー測長系が加工機等に組み込まれた状況では、デッドパス長さの正確な値を直接測定することは困難です。ここでは、環境が変化する状況下で種々のデッドパス長さを設定して補正誤差をモニターし、それが最小になる場合のデッドパス長さを真値として採用しました。その際、環境一定制御チャンバー²⁾を利用して、気圧のみを短時間で変化させる実験を行いました。

まず、加工機上の原点位置(測長系の原点)においてフィードバック制御しない状態で加工機を立ち上げ、加工機がデッドパス長さ L_0 の位置で全く動かない状態を作り出しました。次に、この状態で気圧を 15hPa 増加させ、その際の軸位置情報 I (補正誤差に相当) を CNC 装置内のサーボチェックボードから取得しました。デッドパス長さの設定値 L_0' が真の値 L_0 に一致していれば軸位置情報 I は全く変化しないこととなります。

図2は、Z軸の軸位置情報の変化を異なる2つのデッドパス長さの設定値 L_0' について示

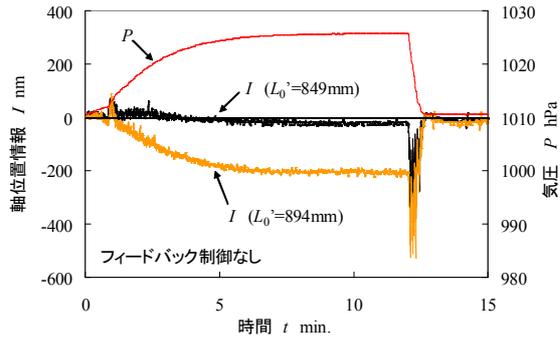


図2 気圧変化時の軸位置出力値

したものです。 $L_0' = 894\text{mm}$ を設定した場合、気圧増加量が 15hPa に達した時点で軸位置情報の値は約 200nm のずれを示しますが、 $L_0' = 849\text{mm}$ の場合では約 30nm と小さく、 849mm がより真値に近いこととなります。同様の実験を L_0' の値を変化させて行い、デッドパス長さの真値として 845mm を採用しました。

環境補正性能の評価

まず、測長器から出力されるレーザパルス数（位置決め指令値）を直接測定することにより、補正性能を評価しました。

図3は、環境補正を行った場合の、Z軸停止時の出力レーザパルス数を変位に換算したもの（以後、レーザパルス換算変位 ΔL_p と記します）を測定した結果です。ここで、加工機 CNC 装置の設定をレーザフィードバックからエンコーダフィードバック（分解能は劣るが環境の影響を受けにくい）に変更しました。この結果、レーザ測長器からのパルスは単に軸位置の変位を反映した値となります。15時間の測定中に気圧Pが 3.19hPa 変化したために、 ΔL_p は補正装置がなければ 604nm の位置決め誤差 ΔL となるはずですが、最大変化量（PV）で 59nm と約 $1/10$ の値となっています。この結果は、本補正装置の使用により、レーザ測長誤差が低減されていることを表しています。

次に、実際の加工を行って補正性能を評価しました。実験は、NiPめっきを施した 10mm 角試料の平面加工とし、約23時間のラスター切削を実施しました。加工面の形状誤差をレーザ干渉計によって測定し、補正の有無による違いを評価しました。図4(a)、(b)にこれらの結果を示します。同図には、実験時の気圧変化と、気圧変化から予想される形状誤差（位置決め誤差）を併記しました。

図4(a)の補正なしの場合、気圧変化量 3.66hPa から予想される位置決め誤差は 534nm

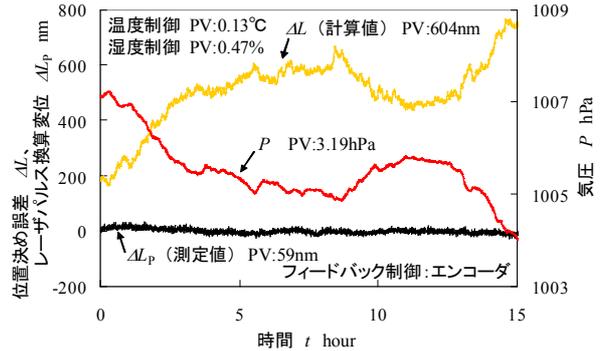
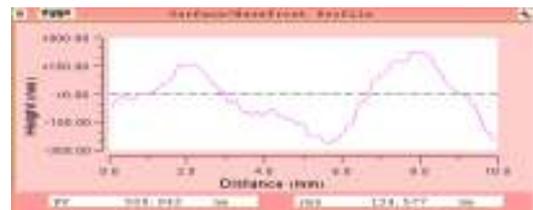
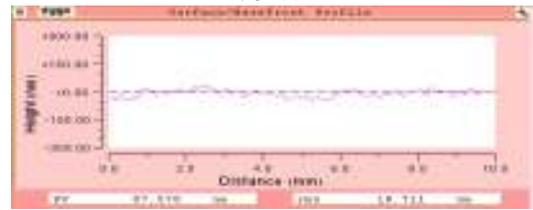


図3 補正時のレーザパルス換算変位



気圧変化:PV=3.66hPa
予想形状誤差:PV=534nm 実測形状誤差:PV=500nm

(a) 環境補正なし



気圧変化:PV=3.11hPa
予想形状誤差:PV=483nm 実測形状誤差:PV=88nm

(b) 環境補正装置使用

図4 ラスター加工時の気圧変化と形状誤差

であり、実測した形状誤差 500nm とほぼ一致しています。これは、気圧変化にともなうレーザ測長誤差（位置決め誤差）が最終的な形状誤差を決定していることを確認したことになります。図4(b)の補正ありの場合、気圧変化量 3.11hPa から予想される形状誤差は 483nm ですが、実測値は 88nm と約 $1/5$ となっており、形状誤差は大幅に低減されています。

以上のように、本補正装置は、実際の加工においても有効であることがわかりました。

おわりに

開発した環境補正装置は、ここで紹介した超精密加工機だけでなく、様々な装置に適用可能です。ご興味のある方はご相談下さい。

参考文献

- 1) 山口勝己：大阪府立産技研 Technical Sheet No. 05001
- 2) 山口勝己：大阪府立産技研 Technical Sheet No. 07003