

光デバイス技術に関する応用研究 (第2報)

—補間制御されたナノステージの評価方法—

中山 信一・石田 正文・木島 一広・布施 嘉裕・坂本 貴仁*

Applied Study of optical devices technology

Shinichi NAKAYAMA, Masafumi ISHIDA, Kazuhiro KIJIMA, Yoshihiro FUSE and yoshihito SAKAMOTO

要 約

ナノステージを評価するためには、補間制御(直線, 円弧等)プログラムとその制御プログラムのおり正確にステージが動作したかを確認する位置情報が必要となる. 本研究では位置情報を得るため, レーザ干渉測長計により, ナノステージ各軸の移動量をナノメートル単位でリアルタイムに計測した. 次に, 制御プログラムにより出力されたリニアスケールの数値及びレーザ干渉測長計より得られたステージの位置情報とから, 動作軌跡をコンピュータ画面上に再現することで, ナノステージの一評価法として検討した. その結果, 各軸の駆動モータの発熱がクローズドループによる補間制御データとレーザ干渉測長計との誤差に影響を及ぼしていることを確認した. このため, 駆動モータからの熱伝導を防ぐ対策を施したことで, 直接的な熱伝導を防ぐことができ, ナノメートル単位の補間制御が可能となった. しかし, 熱伝導によるステージの変動幅を減少し, 変位量の勾配を緩やかにしたが飽和までの総時間は殆ど変化が認められない.

1. 緒 言

近年, 光デバイスの回路形成には, 高速化及び集積化のためにフェムト秒レーザを用いた方法が研究されているが, 3次元空間に対して様々なパターン(直径, 円弧等)で補間され, しかも数nm単位の精度で制御できる高精度なステージが要求されている. しかしながら, 今のところこのような要求を十分に満たすステージは殆ど実在していないのが実状である.

これは, ナノメートルオーダーで駆動されるステージの動作精度として, 1軸毎の真直度や位置決め精度を表記しているのみで, X・Yステージにおいても精々直角の精度が表記されているのみである. 総合的な精度表記として, ステージで加工した試作品の精度を測定することで行われており, ステージの動作精度を正確に把握しているとは言いがたい.

現状ではナノメートルオーダーで動作する3軸駆動ステージの精度および動的評価, 測定光学系に伴う揺らぎ, 周囲温度等の変動による影響もあり, システムの構築において解決すべき課題を含んでいると言える.

そこで, こうしたステージを評価する方法として, ステージ各軸の補間制御の値と移動量とから, 微細加工への適

否を検証する評価システムの構築が求められている.

今年度は, X・Y同時2軸制御によるナノステージの補間動作について, 補間制御の値と実測値との差からステージの評価を行うとともに, 駆動モータの発熱がステージ精度に及ぼす影響について検討した. 以下, その結果について報告する.

2. 実験方法

2-1 ナノステージの構成

図1は, 今回の実験に用いたX・Yナノステージのシステム図である.

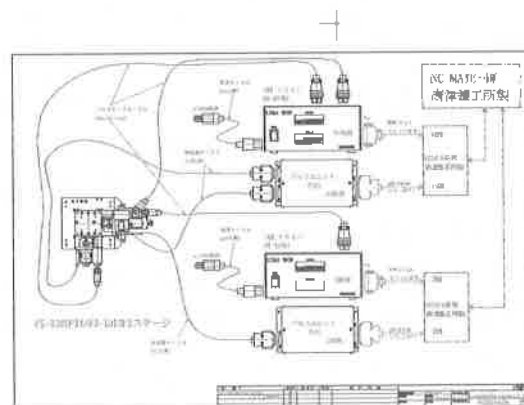


図1 ナノステージの構成図

*1 株式会社エスシーアイ

本システムは、4軸同時制御のパソコンNC基板、X・Y軸用CCLG-A基板、X・Y軸用パルスユニットを経由して、それぞれX・Y軸用のリニアスケールに接続した構造である。一方、それぞれの駆動モータとリニアスケール等により、クローズドループ制御の構成とした。

表1は、X・Yナノステージ(型式FS-1020PXY)の主な仕様を示す。テーブル移動量はX・Y軸ともに20mm、繰り返し位置決め精度は±20nm、最少分解能は10nmである。φ4mm、リード1mmのボールネジとスケール信号周期4μmのリニアスケールを内蔵している。

表1 X・Yナノステージの仕様

仕 様	(型式FS-1020PXY)
テーブルサイズ	60mm×60mm
テーブル移動量	20mm
繰り返し位置決め精度	±20nm
走り平行度	10μm
最少分解能	10nm
最大移動速度	10mm/scc
ボールネジ	φ4mm, リード1mm
移動ガイド	クロスローラガイド
駆動モータ	□28mm, 5相PM
耐荷重	4Kg
内蔵スケール信号周期	4μm
内蔵スケール素材	クォーツガラス(TQZ)

2-1 ステージの温度変化とテーブルの変位量の影響

図2のように、X・Y軸の変位量を計測するために2対のレーザ干渉計とコーナキューブをステージ上にセットした。次にX・Y軸の移動量をナノメートルオーダーで同時に計測し、そのデータを逐次コンピュータに取り込んだ。X・Y軸駆動用モータを励磁し、テーブルを停止した状態でレーザ干渉計によりテーブルの変位量を計測した。

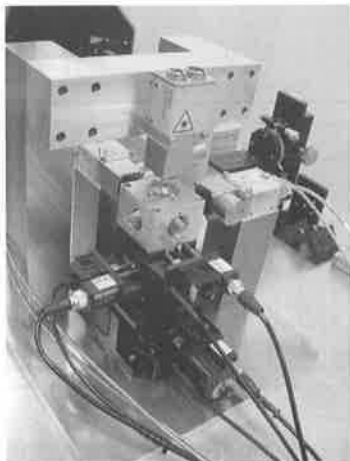


図2 X・Yナノステージ及び測定光学系

また、ナノステージの上方から非接触サーマルビデオシステム(TVS-2000)により、毎秒30フレームで温度分布を計測し、熱画像として疑似カラーで表示するとともにVTRに熱画像を記録した。

非接触サーマルビデオシステムは、ナノステージから放射される赤外線エネルギーを受光し、電気信号に変換し、電気信号をデジタル信号に変換し、256階調の鮮明な熱画像をリアルタイムで表示するものである。

2-2 X・Yナノステージの補間動作の計測

図2は、今回用いたX・Yナノステージ及び測定光学系である。ステージとレーザ干渉測長計(株東京精密製DISTAX)を組み合わせ、ステージの移動量(変位量)をリアルタイムに計測する装置である。ここで用いたレーザ干渉測長計は、最少分解能が約1nmである。ステージのX・Y軸それぞれの計測用として、2個のコーナキューブをステージ上にセットし、レーザ干渉計は門型の架台に固定してある。レーザ干渉測長計のレーザヘッドから発する赤外光を、ステージの上部に固定した反射鏡(コーナキューブ)で反射させ、反射光が干渉計に達するように、アライメントを調整した。この調整をそれぞれX・Yの2軸について行い、レーザヘッドから反射鏡までの移動量を干渉計により検出し、データをコンピュータに逐次保存した。また、円弧補間精度の計測は各種直径を円弧補間プログラムによりデータを出力するとともに、X・Y軸の移動量をレーザ干渉計により計測してコンピュータに取り込み保存し、そのデータに基づきディスプレイ上に移動軌跡として描画した。

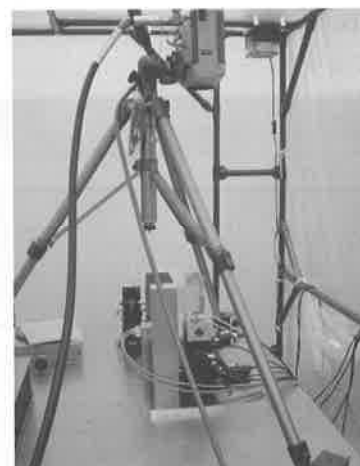


図3 ナノステージの温度分布測定

X・Yステージへの指示は、Gコードの円弧補間プログラムを利用した。測定対象円の直径は、2μm、5μm、10μm、20μmの4種類の円弧補間運動の精度測定を行った。送り速度は、10μm/min~100μm/minの間で選択し

た。レーザによる計測は、0.1secのタイミングでサンプリングを行い、繰り返し3回の計測を行った。

図4は、X・Yステージ全体をサーモグラフィーで観察した画像であり、駆動モータ等各部の配置及びステージ各部の名称を表示している。

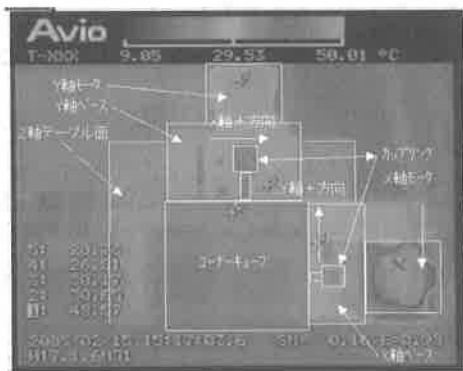


図4 ステージ各部のサーモグラフィー

3. 結果及び考察

3-1 ステージ温度による位置決め精度の影響

ステージ移動用X・Y軸ステッピングモータを励磁した状態でモータからの発熱がステージの安定性にどの程度影響を及ぼすのかを検討した。

図5のサーモグラフィーの画像(120分後)から分かるように、静止状態にも係わらずステッピングモータの発熱が顕著に現れ、励磁後僅か5分程度で約10℃、80分後では50℃程度まで温度が上昇した。さらに、時間経過とともにモータからの発熱が徐々にステージのベースへと伝わり、ステージ自体の温度は最大で10℃程度上昇した。それに伴い、ステージの熱膨張により、最大で2.6 μ mの変位量が生じた。この放熱及び変位量が飽和状態までに要した時間は約120分間であった。



図5 サーモグラフィーの画像(熱対策前)

これら熱膨張による変位量とモータの発熱との相関は推測されるが、変位量自体リニアリティが無く、物体温度による補正は難しい。これはステージの形状及び構成部品

の熱膨張係数の相違によるところが大きいと考えられる。

以上の対策として、発熱源がステッピングモータと限定されたため、モータの熱が熱伝導でステージのベースへ伝わり難くするためにモータとベースの間に熱伝導率の低い物質を介在し、断熱を試みた。断熱材として厚さ1.5mmのベークライト材をワッシャ状に加工して利用した。さらに、モータからの放射熱を増大するために、モータ側面にアルミニウム製のヒートシンクを装着した。図6は、このような熱対策後に再度サーモグラフィーによる温度計測とレーザ干渉測長計による変位量の計測を行った結果である。X・Y軸モータに励磁し、120分間経過後の温度勾配が滑らかとなり、対策前に比べてX・Y軸モータともに32~34℃程度発熱しているのみで、ヒートシンクの効果が確認できた。また、隣接したステージは22~23℃の上昇に抑えることができ、熱対策後の効果が確認できた。

図7は、発熱源であるX・Y軸モータに熱対策前と熱対策後におけるレーザ干渉測長計による変位量の計測結果である。

対策前は、X・Y軸ともに飽和するまでの振幅が大きく不安定であるとともに勾配も大きい。なお、この条件において飽和状態でのX軸の変位量は2.6 μ m、Y軸の変位量は2.1 μ mであった。



図6 サーモグラフィーの画像(熱対策後)

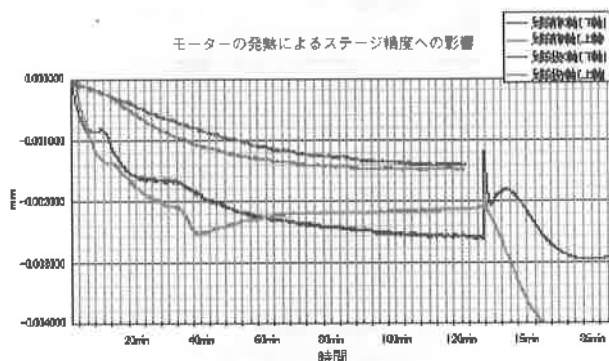


図7 熱対策前後のX・Y軸の変位量

一方、X・Y軸モータに断熱材とアルミ製ヒートシンクにより熱対策を施したものは、飽和状態でX軸の変位量は $1.4\mu\text{m}$ 、Y軸の変位量は $1.5\mu\text{m}$ であり、熱対策前に比べ30~50%の改善が見られた。しかし、変位量が飽和までに要した時間は100分程度必要であり、熱対策前と比較して殆ど変化がない。

熱対策を施したことで、ステージへの直接的な熱伝導は防げたものの、ベースとモータとの間が 1.5mm と近いため、輻射熱によるベースの温度上昇があり、この輻射による温度上昇が緩やかに行われた結果、飽和までの時間が殆ど改善されない原因として考えられる。より高精度なナノステージシステムの構築には、さらにモータ自体の発熱量の低減、熱伝導の遮断及び輻射熱による対策が必要である。

3-2 2次元円弧補間運動の精度測定

2次元円弧補間運動における位置決め精度、等速移動性の精度検証及び計測方法の確立にあたり、ナノステージのX・Y軸の移動精度を確認するため、2セットのレーザ干渉測長計を用いた。前項のモータの発熱による位置決め精度への影響を考慮し、熱対策としてベークライト製ワッシャ及びヒートシンクを装着し、さらにモータの発熱が飽和した状態で計測した。

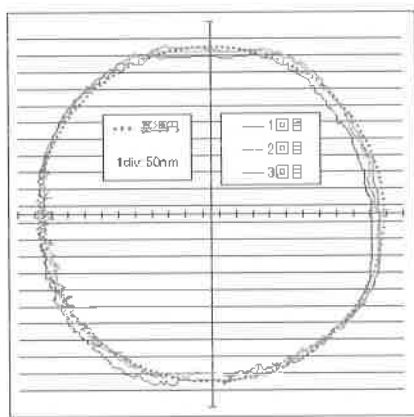


図8 円弧補間精度 ($\phi 2\mu\text{m}$, $F10\mu\text{m}/\text{min}$)

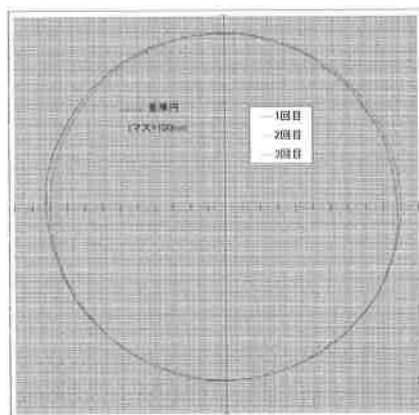


図9 円弧補間精度 ($\phi 20\mu\text{m}$, $F100\mu\text{m}/\text{min}$)

図8は、直径 $2\mu\text{m}$ 、送り速度 $10\mu\text{m}/\text{min}$ で円弧補間を行い、X・Y軸の移動量をレーザ干渉測長計で3回繰り返して計測し、軌跡をプロットしたものである。この結果、X、Y象限では基準円に対して最大 -60nm 、 $-X$ 、 Y 象限では逆に $+90\text{nm}$ 歪んでいる。また、円弧補間において、X軸或いはY軸のみ動作する部分においては、軌跡も直線状に表現されている。

直径 $5\mu\text{m}$ 、送り速度 $50\mu\text{m}/\text{min}$ で円弧補間を行い、X・Y軸の移動量をレーザ干渉測長計で3回繰り返して計測し、軌跡をプロットした。この結果、X、Y象限では基準円に対して最大 -125nm 、 $-X$ 、 Y 象限では逆に $+110\text{nm}$ 歪んでいる。

直径 $10\mu\text{m}$ 、送り速度 $100\mu\text{m}/\text{min}$ で円弧補間を行い、X・Y軸の移動量をレーザ干渉測長計で3回繰り返して計測し、軌跡をプロットした。この結果、X、Y象限では基準円に対して最大 -250nm 、 $-X$ 、 Y 象限では逆に $+200\text{nm}$ 歪んでいる。

図9は、直径 $20\mu\text{m}$ 、送り速度 $100\mu\text{m}/\text{min}$ で円弧補間を行い、X・Y軸の移動量をレーザ干渉測長計で3回繰り返して計測し、軌跡をプロットしたものである。なお、サンプリングは 0.1 秒間隔で行った。3回の計測結果において、X、Y象限では基準円に対して最大 -300nm 、 $-X$ 、 Y 象限では逆に $+300\text{nm}$ 歪んでいる。

3-2 円弧補間直径と変位量

図10は円弧補間直径(送り速度)と最大変位量との関係を示す。ここでは、直径 $2\mu\text{m}$ 、送り速度 $10\mu\text{m}/\text{min}$ 、直径 $5\mu\text{m}$ 、送り速度 $50\mu\text{m}/\text{min}$ 、直径 $10\mu\text{m}$ 、送り速度 $100\mu\text{m}/\text{min}$ 、直径 $20\mu\text{m}$ 、送り速度 $100\mu\text{m}/\text{min}$ の直径の異なる4種類の円弧補間を行い、それぞれの最大誤差を求めた。この結果、送り速度が増すに伴い最大変位量も増加することから、微小径や高精度な円弧補間を行う場合、加工効率を考慮して送り速度を低下させる必要がある。

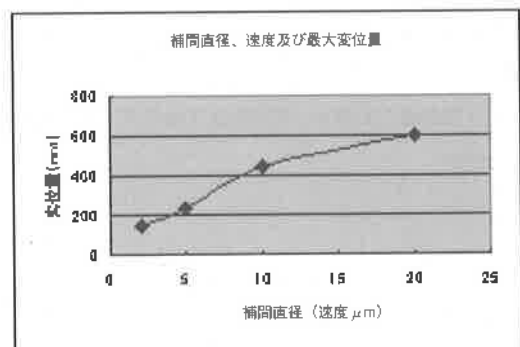


図10 円弧補間直径(送り速度)と最大変位量

4. 結 言

ナノステージの補間制御における位置決め精度と等速移動の精度検証、測定方法の確立を目的に研究を行った。当初、測定値のバラツキが大きく室温や空気の揺らぎ、振動等の測定環境が大きく影響しているものと考え、ユニットを覆うなど対策を施したが、効果が現れなかった。そのため、ボールネジを使用したステージで起こりがちな熱膨張がナノステージに与える影響について検討した。さらに、熱対策後に円弧補間制御を行い位置決め精度と等速移動の精度検証を行い、以下の結果が得られた。

(1) サーモグラフィーの画像データからステップングモータの発熱が著しく、ステージが停止状態に関わらず励磁後僅か5分程度で約30℃、80分後には50℃程度まで温度上昇が認められた。モータからの発熱が徐々にベースからステージへと伝わり、ステージ温度は最大で約30℃程度まで達した。それに伴いステージの熱膨張の影響で、最大2.6 μ mの変位量が確認できた。この結果、熱飽和までには約100分間必要である。

(2) ナノステージのX・Y軸モータからの熱影響の対策として、ベークライト製ワッシャとヒートシンクを用いた。熱対策後におけるサーモグラフィー画像から、X・Y軸モータが32~34℃程度発熱しているのみで、直近のステージは22~23℃の温度上昇に抑えることができた。

(3) 直径20, 10, 5, 2 μ mの基準円に対して、100~10 μ m/secの送り速度で円弧補間し、0.1sec間隔でX・Yステージの移動量を計測した。基準円直径からの最大変位量は、直径が20 μ mで ± 300 nm, 直径10 μ mで+200nm, -250nm, 直径5 μ mで-125nm, +110nm, 直径2 μ mでは-60nm, +90nmと円弧補間の直径が小さくなるに伴い、最大変位量も小さな値を示す傾向にあった。

(4) 円弧補間直径(送り速度)と最大変位量との関係は、送り速度が増すに伴い最大変位量も増すことから、微小径や高精度な円弧補間を行う場合、加工効率を考慮して適正な送り速度を選択する必要がある。

参考文献

- 1) レーザー学会編：先端レーザーテクノロジー，日経技術図書株式会社(1992)