

安定化格子干渉方式を用いた
高精度 3 次元エンコーダの開発

2021 年度

田宮 英明

学位論文 博士（工学）

安定化格子干渉方式を用いた
高精度 3 次元エンコーダの開発

2021 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

田宮 英明

目次

第1章	緒論	1
1-1	緒言	1
1-2	エンコーダに求められる安定性と分解能	1
1-3	従来の変位検出技術とその課題	5
1-4	本研究の目的	10
1-5	本論文の構成	13
第2章	XY軸上の変位検出における格子干渉計の確認	14
2-1	緒言	14
2-2	XY軸上の変位検出における格子干渉計の原理	14
2-3	XY軸上の変位検出における格子干渉計の実装	18
2-4	XY軸上の変位検出における格子干渉計の検証	20
2-5	結言	28
第3章	Z軸上の変位検出における格子干渉計の開発	30
3-1	緒言	30
3-2	Z軸上の変位検出における格子干渉計の提案	30
3-3	Z軸上の変位検出における格子干渉計の実装	33
3-4	Z軸上の変位検出における格子干渉計の検証	36
3-5	結言	49
第4章	XZ軸上の変位検出における格子干渉計の開発	50
4-1	緒言	50
4-2	XZ軸上の変位検出における格子干渉計の提案	50
4-3	XZ軸上の変位検出における格子干渉計の実装	56
4-4	XZ軸変位検出の格子干渉計の検証	59
4-5	結言	73
第5章	開発された3次元エンコーダの性能比較	76
5-1	緒言	76
5-2	開発した3次元エンコーダの性能	76
5-3	結言	80
第6章	結論	82
	付録	84
	謝辞	87
	参考文献	88
	関連論文	93

第 1 章 緒論

1-1 緒言

1965 年 4 月に Electronics 誌に掲載された Gordon E. Moore 氏の有名な論文「Cramming more components onto integrated circuits」^[1]では、微細化技術によって集積回路あたりの半導体素子の数が年々増加するとともにコスト低減が可能になり、家庭用コンピュータ、自動車の自動制御、個人用の携帯通信機器など、コンピュータが我々の生活に浸透していくことが示された。後のムーアの法則の誕生である。56 年経った今でも集積回路の中の半導体素子の数は増え続けており、半導体技術の発展によって我々の生活は、さらに変化しようとしている。

半導体の分野において、集積回路の微細化は、今のところ半導体露光装置によって決まると言っても過言ではなく、集積回路の密度を実現^[2-5]するうえで、半導体露光装置の性能の向上は必要不可欠となっている。この性能の向上は、常にこのムーアの法則を意識しながらこれまでに幾度も技術的な壁^[6-13]を乗り越えてきている。

本章では背景として、微細化技術の最先端にあたる半導体露光装置を例に挙げて、変位検出に求められる性能と、従来技術とその課題について説明した後、本研究の目的について述べる。

1-2 エンコーダに求められる安定性と分解能

2010 年に、ニコンと ASML から発売された液浸スキャナ式露光装置は、ロジック半導体におけるゲートの線幅の中心から線間の中心までの距離(Half pitch)の微細化を向上させるために今までにない規模の構造変更がかけられた。

露光装置の解像度 R (Resolution half pitch)は、レジスト材料や露光方式で決まる比例係数(プロセスファクター)を k_1 とすると $R = k_1 \cdot \lambda / NA$ で表すことができる^[14]。つまりこの解像度は、露光装置の投影光学系の開口数 NA と露光波長 λ で決定され、光源として用いたエキシマレーザー(ArF)の波長が 193 nm、開口数 NA は液浸にすることによって 1.35 まで拡大させられ、 k_1 は 0.2 に達していた。そしてさらにこの k_1 を小さくするための手段としてマルチパターンニング技術^[15-22]が導入された。マルチパターンニング技術の代表例として、ピッチスプリット型のダブルパターンニング法を **Fig. 1-2-1** に示す。ウェハのシリコン基板には、被加工層と犠牲層とレジストが成膜される。最初に第 1 パターンが露光され現像される。次にスリミングという工程で、パターン寸法を小さくした後、犠牲層をエッチングし、再びレジストを塗布する。第 2 パターンの露光は、第 1 パターンの間に正確に露光され現像する。そして第 2 パターンのスリミングを行い、被加工層をエッチングすることで投影光学系の解像度以上のパターンが形成でき、結果的に k_1 は半分になるという技術である。

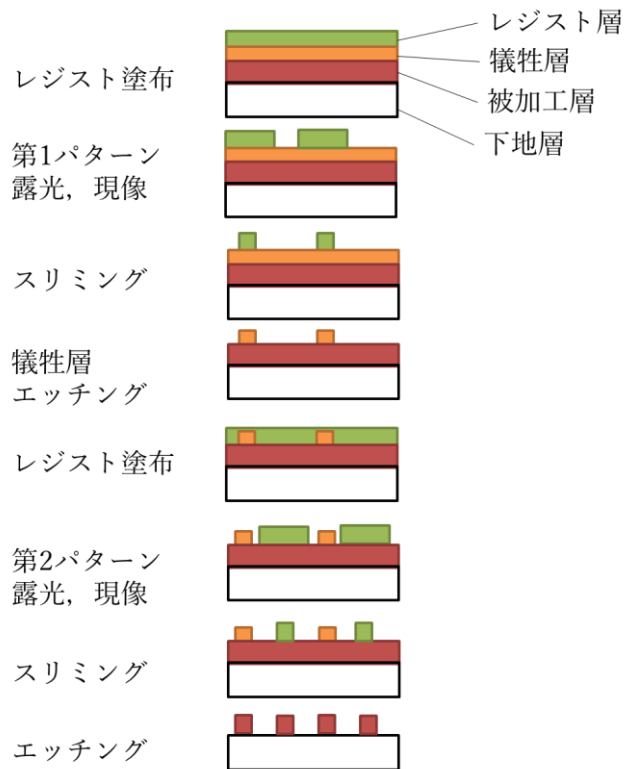


Fig. 1-2-1 ピッチスプリット型のダブルパターニング法の工程

ここで第 1 パターンと第 2 パターンの重ね合わせ精度が非常に重要となる。つまりマルチパターニング技術は、プロセスによって露光装置の解像度以上のパターン形成を可能にするが、対応させるには露光の重ね合わせ精度を従来に対し、半分にする必要があった。この技術は現在の EUV 露光装置でも応用されており、液浸スキャナ式露光装置に関しては、さらに露光回数を増やした 4 回露光も検討されるなど、露光の重ね合わせ精度の改善は常に行われている。

半導体露光装置の構成について簡素図を Fig. 1-2-2 に示す。本構成図は、すでに公開されているニコン製の半導体露光装置構成図^[23]を参考に作成したものである。半導体露光装置は、フォトマスクとなるレチクルを投影光学系によって 1/4 に縮小しウェハに露光する仕組みとなっている。レチクルステージとウェハステージは光波干渉計によって制御され、レチクルステージは、ウェハステージに同期追従して動くようになっている。ここで XYZ 軸の定義は、JISB6310「産業オートメーションシステム—機械及び装置の制御—座標系及び運動の記号」にて、主軸を Z 軸と定義していることに対し、半導体露光装置の投影光学系の光軸を Z 軸と定義する。

マルチパターニング法を実現させるには、特に縮小露光されるウェハステージの再現性を上げ、ウェハの重ね合わせ精度をそれまでの倍以上に改善する必要があった。このウェハの重ね合わせの要求精度は、液浸スキャナ式露光装置で 2 nm を下回るレベル^[24,25]になった

ことで、ステージ制御に使用していた光波干渉計の空気の揺らぎの影響^[26,27]が深刻になった。

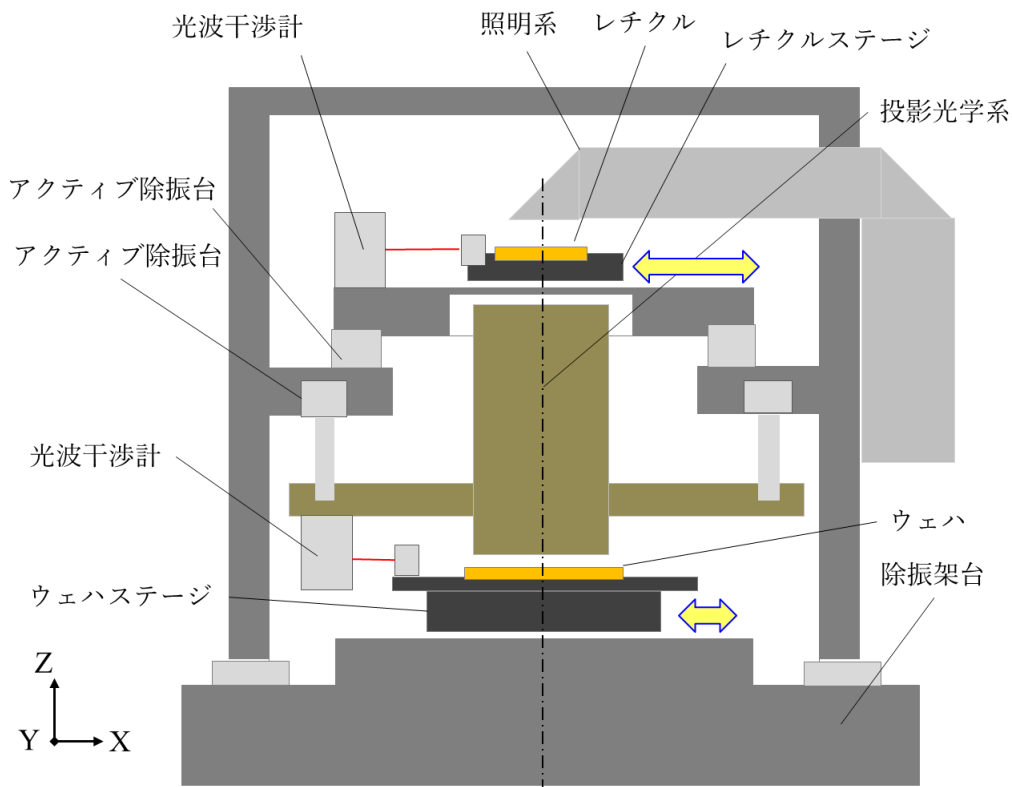


Fig. 1-2-2 半導体露光装置の構成図

光波干渉計に代わるウェハステージの制御方法^[28]として、半導体露光装置メーカーであるニコンと ASML は、ほぼ同時期にエンコーダを用いた実施例を特許^[29,30]として出願した。参考文献「半導体微細パターンニング」^[31]の中で、柴崎祐一氏が示したエンコーダ計測系の2つの実施形態図を参考に作成した構成図を Fig. 1-2-3 と Fig. 1-2-4 に示す。第1例は、ウェハステージ上に回折格子なる平面スケールを設置し、ボディ側複数のセンサを設置し変位検出する方法を採用した。一方、第2例はボディ側に大きな回折格子からなる平面スケールを設置し、ウェハステージにセンサを設置し変位検出する方法を採用した。いずれの方法も重ね合わせ精度は、光波干渉計に比べて約半分に改善されたと述べられている。重ね合わせ精度はその後にも改善され^[32,33]、微細化と共に向上し続けている。Fig. 1-2-5 は既に公開されている ASML の資料^[34]を参考に、ウェハの重ね合わせ精度のロードマップを作成した。ウェハステージに使用される XY 軸上の変位検出におけるエンコーダの性能は、重ね合わせ精度の 1/10 の再現性と考えられ、変位検出の分解能は、要求される再現性を得るために再現性の 1/5 は必要であると考えられる。

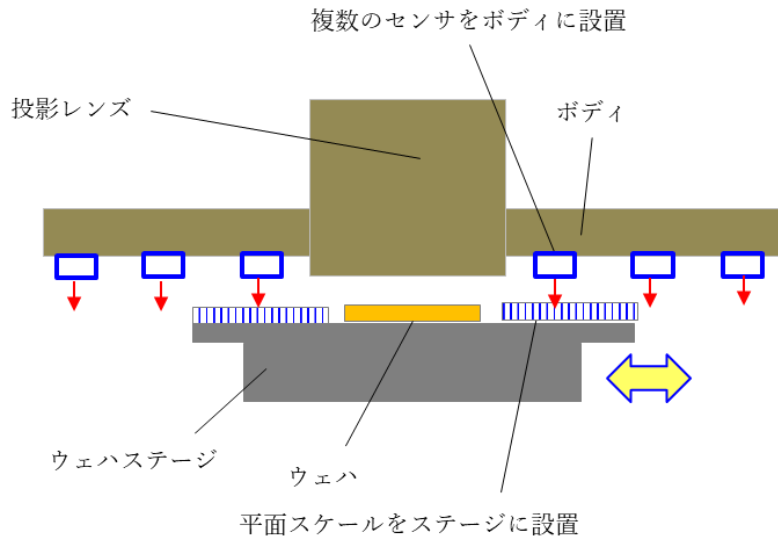


Fig. 1-2-3 ウェハステージ制御のエンコーダ構成の第1例

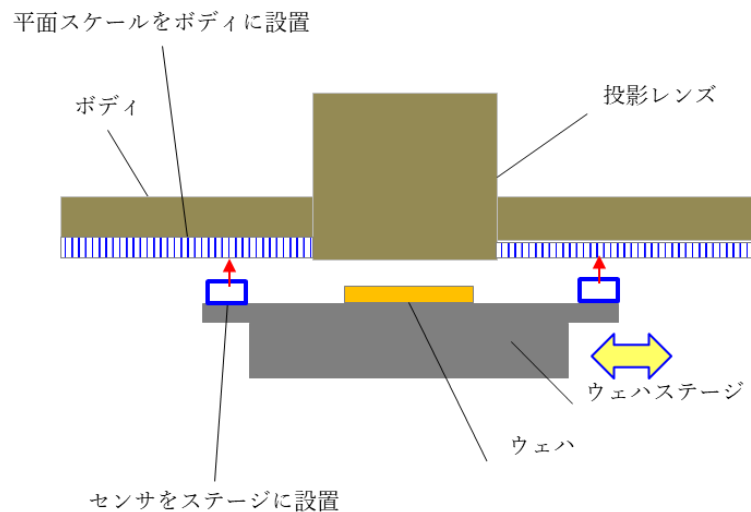


Fig. 1-2-4 ウェハステージ制御のエンコーダ構成の第2例

また両社は重ね合わせ精度の改善と共に、露光のフォーカス精度の改善を実現させるためにウェハステージのXY軸上の制御に加え、1mmのわずかな範囲であるがウェハの面の状態やXYステージの傾きに合わせてZ軸上の制御も行っていた。前述した露光装置の投影光学系の開口数 NA の拡大に伴い、露光パターン幅の品質に関する焦点深度 DOF (Depth of focus)も重要なファクターとなっていたからである^[35-42]。焦点深度 DOF は、露光装置の投影光学系の開口数 NA と露光波長 λ 、レジスト材料で決まる第2のプロセスファクター k_2 で決定され、 $DOF = k_2 \cdot \lambda / NA^2$ で表すことができる。 k_2 は形成するパターンやプロセスによって変わるが、一般に $k_2 = 1$ と考えてよい。例えば露光波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ (ArF)、 $NA = 0.92$ の投影光学系に必要な焦点深度 DOF は、おおよそ228 nmとなる。しかし実際は線幅のラフ

ネスを最適化するためにマルチパターン露光導入前から 40 nm 程度で制御され露光パターンの品質を上げていた。真空中でステージ制御を行う最先端の EUV 露光機になると再び光波干渉計による制御にメリットが出てくるが、EUV 露光機以外の大気中の露光装置では、現在もマルチパターン露光が進んでおり、4 回露光となると、焦点深度は 10 nm 程度で制御されていることが考えられる。したがって将来的にこの計測に用いられる Z 軸上の変位検出におけるセンサの再現性は、焦点深度の制御の 1/10 は必要であり、変位検出の分解能は、要求される再現性を得るために再現性の 1/5 は必要であると推測される。

露光装置以外の半導体製造装置全般においても高精度化が進んでおり、例えば最先端短波長レーザを使用したマスク検査装置では、大気中において高精度な EUV マスク検査を行っており、ステージ制御の高精度化において空気の揺らぎの影響を受けにくいエンコーダは重要な役割を担っている。

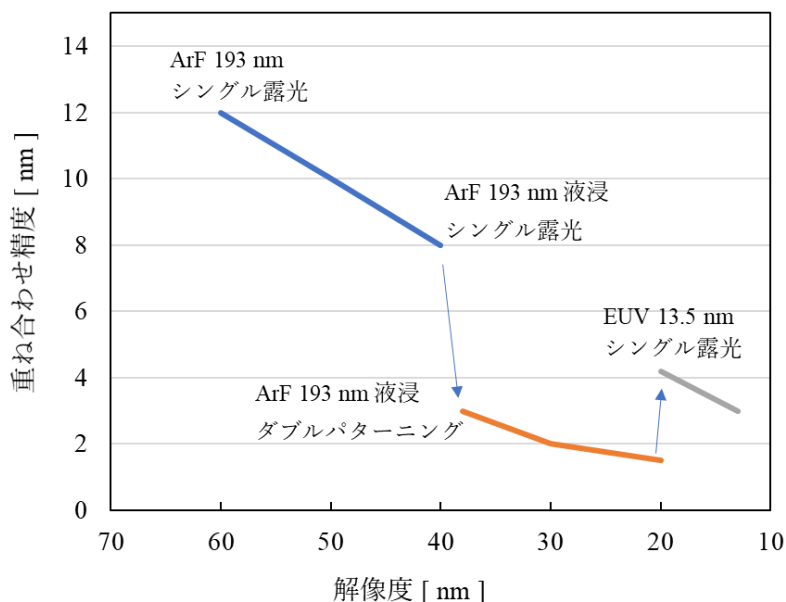


Fig. 1-2-5 ウェハの重ね合わせ精度のロードマップ

1-3 従来の変位検出技術とその課題

従来の変位検出技術として XY 軸上における変位を非接触で検出する方法を Fig. 1-3-1 に示す。本研究における XY 軸上の変位検出は、半導体製造装置等のステージ制御を前提としているため、最大で 1000 mm の範囲の変位を検出する方法に限定している。大きなカテゴリとして光学式、電磁誘導式、磁気式、超音波式に分類される。

電磁誘導式と磁気式はリニアエンコーダが一般的であり、数百マイクロメートルピッチで周期的に着磁されたスケールをヘッドによって検出する原理が数多く存在する。一方、超音波式は環境の変化に対し影響を受けやすく、計測分解能が例えば 10 MHz で 0.3 mm と非常に低いため、限られた使用目的において観察用途に使われている。

半導体製造装置等のステージ制御においては、XY 軸上の変位検出に関して、光学式が最も多く使われており、光波干渉計とリニアエンコーダに分類できる。光波干渉計は、光源に He-Ne レーザを用いることが一般的であり、光の波長を長さの基準にしているため、正確な相対距離を計測する最も有効な方法となっている。さらに高速な検出が可能でステージの高速制御も容易である。しかし空気の揺らぎの影響を受けやすく、光路が 1000 mm にも達すると数十ナノメートルの計測誤差になるケースもあり、半導体露光装置では深刻な問題となっている。

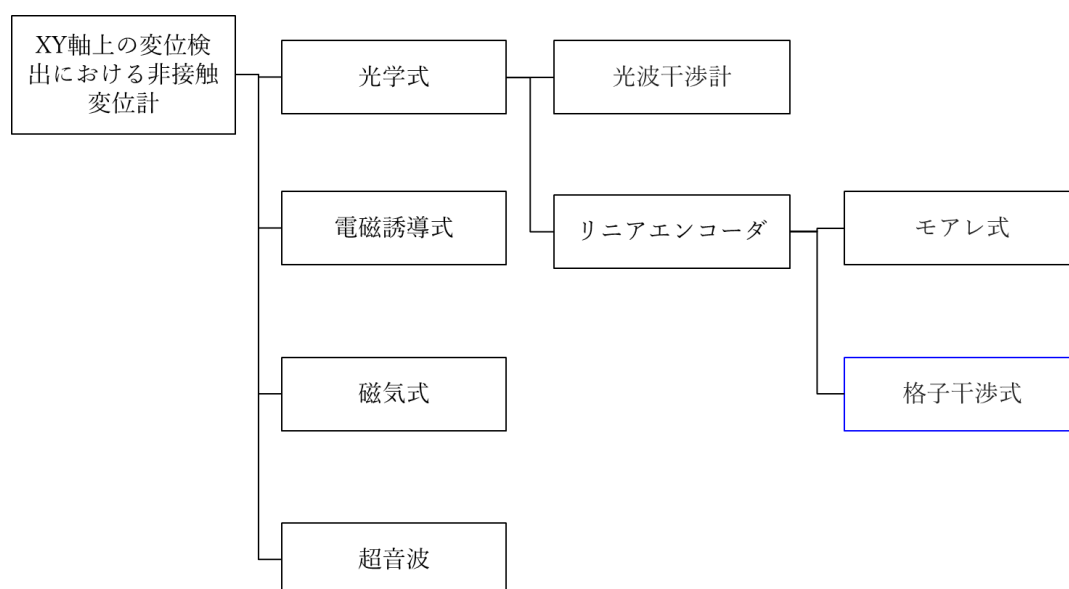


Fig. 1-3-1 XY 軸上の変位検出における非接触変位計の種類

リニアエンコーダは、モアレ式^[43]と格子干渉式^[44,45]に分類される。モアレ式は格子スケールと検出ヘッド内のスレイブ格子で作られるモアレ縞の変化から、格子スケールの相対変位を検出する原理で、一般に格子ピッチは数十マイクロメートルと粗い反面、応答スピードが高いため、制御分解能がサブミクロンの搬送用ステージにおいて多く使用される。それに対し、格子干渉式は、回折格子スケールを用い、その回折格子にレーザ等を照射し、回折したビームに乗じられた回折格子スケールの位相情報を干渉によって検出する原理で、格子ピッチの 1/2 倍から 1/4 倍の細かい信号周期を得ることが特徴である。例えば格子ピッチが 1000 nm である場合、格子干渉計の信号周期は 250 nm になる。もう一つの特徴として、光波干渉計のように空気の揺らぎの影響を受けることはほとんどなく、気圧変化や湿度変化に対してロバストであることから、制御分解能がサブナノメートルを要求される場合において、光波干渉計よりも安定した計測ができるというメリットを持つ。

次に被計測物の Z 軸上の変位検出を非接触で行う方法を Fig. 1-3-2 に示す。本研究における Z 軸上の変位検出は、前記 XY 軸上の変位検出に対し比較的狭い 1 mm の範囲の変位を検

出する方法に限定している。それは、大きなカテゴリとして光学式、静電容量式、電磁誘導式、磁気式、超音波式に分類され、狭い範囲の変位検出に特化した静電容量式^[46]が加わる。光学式の中はレーザ変位計、フォーカスセンサ^[47]、光ファイバ干渉計、光波干渉計に分類される。しかしながら被計測物の高さ方向を直接計測するような格子干渉式の変位計は、これまで開発されていない。

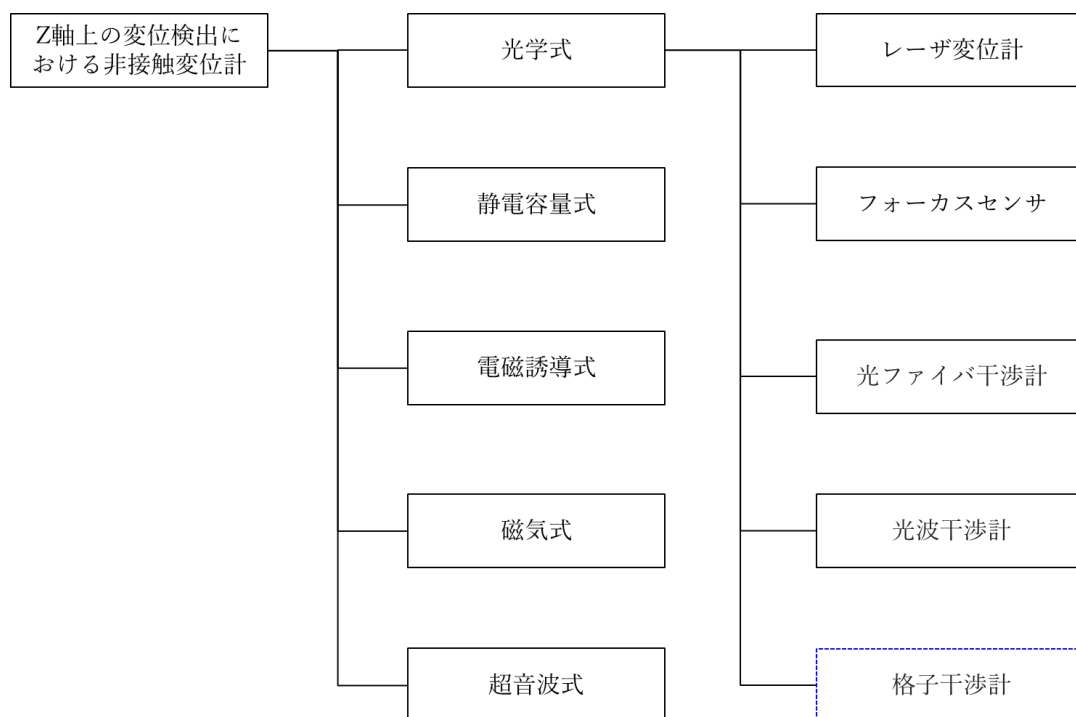


Fig. 1-3-2 Z 軸上の変位検出における非接触変位計の種類

まず光学式の中では、レーザ変位計が一般的に知られており、被計測物が鏡面でなくても計測できることから幅広い分野で使われている。これは三角測量を応用した方式で、被計測物から反射された光を受光素子上に照射し、被計測物の Z 軸上の移動による受光素子上の照射位置の変化を検出することで、被計測物の Z 軸上の変位を検出する。しかしこの原理は、検出分解能と計測範囲がトレードオフになっており、ナノメートルレベルの分解能を得るためには計測範囲が 0.1 mm 程度に制限されてしまう。さらに S/N を上げるために変位検出データの平均化を行う必要があり、高速な検出ができないことから、制御用途での使用は不可能で、計測用途に限られている。

レーザ光を対物レンズにより被計測物上に集光させ、被計測物から反射される光に非点収差を与え、4 分割受光素子に結像することで、被計測物上のデフォーカス量に応じて、4 分割受光素子に結像する像の変化から変位量を検出するフォーカス式の変位計がある。メリットとしてレーザ変位計同様に被計測物が鏡面でなくても検出可能で、対物レンズによる集光の N.A. (開口数) が比較的大きいことで、被計測物面の角度許容も大きいことがあ

げられる。しかし Z 軸上の変位検出には、対物レンズをボイスコイルモーター等でフォーカスサーボをかける都合上、応答周波数は数百ヘルツに制限されることや、被計測物上に集光させていることで、被計測物の表面粗さが大きな計測誤差を発生させる場合があることが、デメリットとなっている。

光ファイバ変位計は、可干渉性の低い光源を用いて、物体光と参照光が干渉できる短い範囲の干渉信号を検出する方法であり、ピコメートルレベルの変位検出が可能で、高速な検出もできることがメリットとしてあげられる。しかし検出範囲が数十マイクロメートルと非常に狭く、使用用途が限られる。

可干渉性の高いヘリウムネオンレーザ等を用いて、被計測物に照射し反射して戻る物体光と、固定されたミラーによって反射して戻る参照光とを干渉させるマイケルソン型の光波干渉計を組む方法は、検出範囲が非常に長く、高速検出も可能で、ピコメートルレベルの分解能を得ることができる反面、物体光と参照光の光路長差から環境の影響を受けやすく、光源である He-Ne レーザ(ヘリウムネオンレーザ)等の波長を安定化させる工夫が必要であり、使用環境の温度や気圧、湿度のリアルタイム補正が必要となっている。特に空気のランダムな揺らぎの影響は、ピコメートルレベルの検出には致命的であり、優位性が得られる条件としては、真空中などの環境となる。

従来の変位検出技術の中には、格子干渉式のエンコーダと組み合わせて、XY 軸上の変位検出に加えて、限られた範囲であるが、Z 軸上の計測も可能にした例が提案されている。Fig. 1-3-3 に東北大学 Professor Gao Wei が提案した回折光干渉型のエンコーダ^[48,49]による実施例を示す。

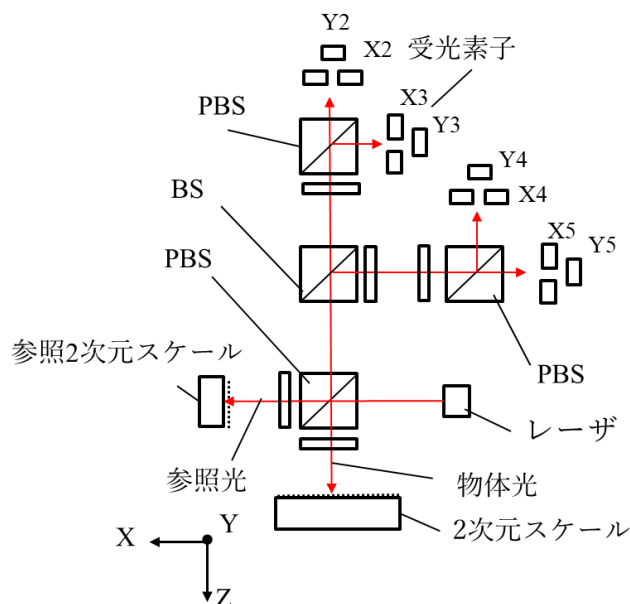


Fig. 1-3-3 回折光干渉型エンコーダ実施例

レーザから出射したビームは、偏光ビームスプリッタ(PBS)によって2つに分けられ、被

計測対象である2次元スケールに物体光が照射される。一方、リファレンスとなる参照2次元スケールは固定されており、参照光が照射される。2次元スケールがX軸上もしくはY軸上を移動する場合に、2次元スケールの位相情報が物体光に乘じられるため、参照光と干渉させることでXY軸上の変位検出における干渉信号が得られる。2次元スケールがZ軸上を移動する場合、物体光と参照光の光路長に差が出るため、マイケルソン干渉計としてZ軸上の変位検出における干渉信号が得られるという原理である。この原理のメリットは、XYZ軸上の変位検出における2次元スケール上の検出位置が、一致していることにある。一方、Z軸上の変位検出においては、光波干渉計と同様に物体光と参照光の光路長差から生じる安定性悪化の対策が必要であると考えられる。

格子干渉式のエンコーダと組み合わせてZ軸上の計測も可能にした第2例として、ハイデンハイン社のXZ軸上の変位検出におけるエンコーダ実施例^[50]の特許を参考に作成した原理図をFig. 1-3-4に示す。

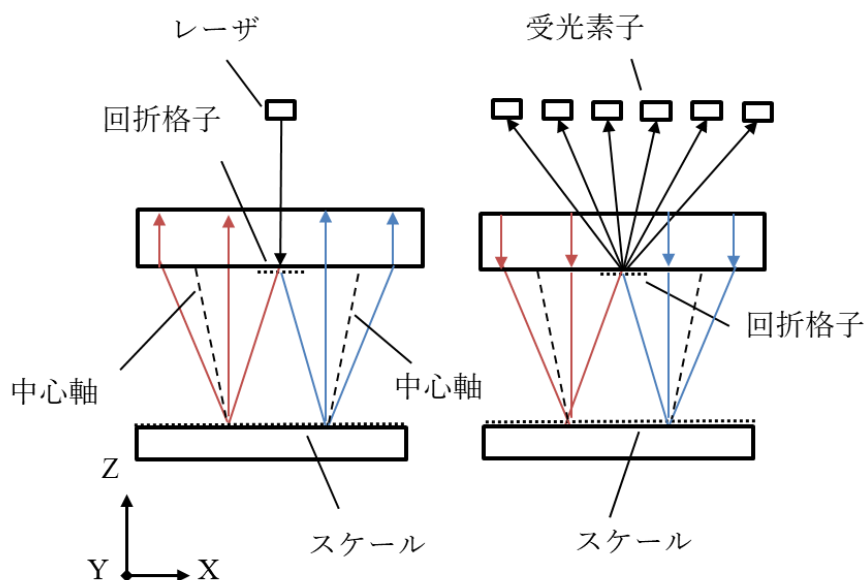


Fig. 1-3-4 XZ軸上の変位検出におけるエンコーダ実施例

同原理図は、XZ面の検出光学系を示しており、左図のレーザから出射されたビームは回折格子によって2分割され、2つのビームはスケールに斜めに入射し回折光となり、その後上部のミラーによって反射され、右図で再びスケールに入射され回折格子によって重ね合わされ複数の干渉光を得るといふ格子干渉式である。この原理ではX軸上の変位検出は、X軸に垂直なYZ面に対し非対称な2つの格子干渉計の差から計算され、Z軸上の変位検出は、その2つの格子干渉計の加算から計算される。しかしこの原理の場合、Z軸上の変位検出に関しては、YZ面に対し非対称な格子干渉計によって、スケールがZ軸上を移動することで、互いに干渉し合うビームに光路長差が発生し、光源の波長変動の影響が出てしまうことが特許に示されている。今後Z軸上の計測が高精度化していく中で、格子干渉計内の

干渉し合うビームの光路長差からくる安定性の悪化は問題になることは十分に考えられる。もう1つの課題は、2つの格子干渉計の中心軸が互いに傾いているため、スケールのZ軸上の移動によってスケール面上の2つの検出位置が変化してしまうことにある。例えば、2次元スケールによるXYZ軸上の高精度な制御では、2次元スケールのリニアリティ（直線性に対する誤差）を細かく補正して使用することが一般的である。その補正ピッチは、制御側の能力にもよるが、数ミリピッチと考えてよく、2次元スケールのリニアリティの補正にはXY面のマップ状の補正情報を用意しなければならない。ここで2次元スケールがZ軸上に移動することによって2次元スケール面上の検出位置が変化するという事は、XY面にZ軸を加えた3次元のマップ補正が必要になることを意味し、これを回避するには、極めて高いリニアリティ性能を持つ2次元スケールを作らなければならなくなる。

以上、干渉計を用いたZ軸上の変位検出における従来技術の共通課題としては、スケールや被計測物がZ軸方向に移動することで、検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差が発生してしまうことである。これら従来技術に関する解決策を次の1-4節で述べる。

1-4 本研究の目的

干渉計を用いたXYZ軸上の変位検出において、従来技術の共通の課題としては、被測定物やスケールがZ軸上を移動することで、検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差が発生してしまうことで、光源の波長変化などが生じると、変位検出にドリフトが生じてしまうことが挙げられる。よって干渉計を用いた変位検出を検討する上で、検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差を発生させない光学原理の提案が重要になる。つまり安定性を S とすると次式の条件にする必要がある。

$$S \geq (L_A + L_Z) \cdot \Delta\lambda \cdot D / \lambda^2 \quad (1-4-1)$$

ここで L_A は干渉計の互いに干渉する検出光路の調整精度や部品精度による初期光路長差、 L_Z はZ軸上の変位によって発生する光路長差、 λ は光源の波長、 D は干渉計の信号周期、 $\Delta\lambda$ は環境起因による波長変動である。

Table 1-4-1 にZ軸上の変位検出における従来技術の性能と本開発である格子干渉計の性能目標値の比較を示す。

従来技術であるマイケルソン干渉計型は、初期光路長差 L_A をゼロとした場合でも、Z軸上の計測範囲が1mmにおいて L_Z は2mm発生することになる。光源に波長安定性の高いHe-Neレーザを用いたとしても、大気環境における屈折率変化の影響は、気圧で1hPaあたり0.27ppm、湿度で10%あたり0.07ppm、温度で1°Cあたり1ppmであることから、温度変化1°C、気圧変化30hPa、湿度平均±10%の環境では、気圧が最も大きな変動要因となり安定性は8.1nmと見積もられる。またHe-Neレーザ自身の波長安定性は1ppmレベルとされており、2mmの光路長差があることで1.6nm相当がノイズとして検出されることが考え

られる。

Table 1-4-1 Z 軸上の変位検出における従来技術と本開発格子干渉計の目標値の性能比較

	安定性 $S \geq (L_A + L_Z) \Delta\lambda D / \lambda^2$ 計測範囲: 1mm, 計測環境の変化: 温度 1°C, 気圧 30 hPa, 湿度平均± 10 %	分解能	計測範囲	応答速度	特徴
レーザー変位計	-	10 nm	10 mm	1 mm / s	分解能低い 応答速度が低い
フォーカスセンサ	-	1 nm	1 mm	10 mm / s	応答速度が低い
ファイバ干渉計	$L_Z = 2 \text{ mm},$ $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}, \lambda = 850 \text{ nm},$ $D = 425 \text{ nm},$ $S = 352.9 \text{ nm}$	0.1 nm	0.1 mm	2000 mm / s	スーパーミネッセントダイオード 計測範囲狭い 温度依存性が高い
マイケルソン干渉計型	$L_Z = 2 \text{ mm},$ $\Delta\lambda = 0.0051 \text{ nm}, \lambda = 632.8 \text{ nm},$ $D = 316.4 \text{ nm},$ $S = 8.1 \text{ nm}$	0.02 nm	非常に広い	2000 mm / s 以上	He-Ne レーザ 高応答速度, 高分解能 気圧補正が必要
従来実施例 回折光干渉型エンコーダ	$L_Z = 2 \text{ mm},$ $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}, \lambda = 685 \text{ nm},$ $D = 342.5 \text{ nm},$ $S = 437.3 \text{ nm}$	0.02 nm	1 mm	2000 mm / s 以上	半導体レーザー 高応答速度 温度依存性が高い
従来実施例 XZ 軸上の 変位検出におけるエンコーダ	$L_Z = 0.21 \text{ mm},$ $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}, \lambda = 850 \text{ nm},$ $D = 1000 \text{ nm},$ $S = 86.6 \text{ nm}$	0.2 nm	1 mm	2000 mm / s 以上	半導体レーザー 高応答速度 光源の温度依存性が高い
本開発の Z 軸上の 変位検出における格子干渉計の目標値	$L_Z = 0.015 \text{ nm (目標値)},$ $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}, \lambda = 790 \text{ nm},$ $D = 138 \text{ nm},$ $S = 1 \text{ nm}$	0.02 nm	1 mm	2000 mm / s 以上	半導体レーザー 高応答速度 高分解能で高安定性

また半導体レーザーを用いた回折光干渉型エンコーダや、スーパーミネッセントダイオード光源を用いたファイバ干渉計は、光源の温度変化による発振波長の変化の影響が最も大きくなり、その影響は一般的に公開されているデータシートから 1°Cあたりの $\Delta\lambda$ を 0.3 nm とすると、He-Ne レーザに対し 2 桁ほど安定性が悪化することが考えられる。また可干渉性の低い光源を使用すると、計測範囲が数十マイクロメートルと非常に狭くなってしまふ。

従来の実施例である XZ 軸上の変位検出におけるエンコーダにおいては、格子干渉計の信

号周期 D が小さくなるほど回折角が大きくなることで Z 軸上の変位によって発生する光路長差 L_Z が大きくなってしまいます。したがって信号周期 D で決定される分解能と光路長差 L_Z はトレードオフの関係になる。例えば、信号周期 D を 1000 nm にした場合、 L_Z は 0.21 mm 発生し、半導体レーザを使用すると変位検出に 86.6 nm のドリフトを生じてしまうことになる。

このように従来の技術では、 Z 軸上の変位によって発生する光路長差 L_Z を原理的に発生させないという観点で検討されていないため、 Z 軸上の高精度な変位検出に課題がある。そこで検出光路の互いに干渉するビームの光路長差をキャンセルできる格子干渉式の特徴を応用し、 Z 軸上の変位検出においても、検出光路の光路長が変化しない原理の提案と、その格子干渉計の開発を行うことにした。

したがって本研究で開発する 3 次元エンコーダは、XYZ 軸上の変位検出に関して格子干渉計による変位検出原理の提案と、背景として挙げた半導体露光装置で要求される分解能や安定性を満たすために、XY 軸上の変位検出における目標スペックは、前述した重ね合わせ精度の 1/10 の再現性、つまり平均値 \pm 0.2 nm の安定性と、変位検出の分解能は、目標とした再現性の 1/5 である 40 pm とした。一方、 Z 軸上の変位検出における目標スペックは、1 mm の計測範囲を有し、この計測範囲から少なくとも 3 mm のワーキングディスタンスを持つ必要があり、前述した要求精度の 1/10 の再現性である平均値 \pm 1 nm の安定性と、変位検出の分解能は、目標とした再現性の 1/5 である 0.2 nm を達成させることを目標にして **Table 1-4-2** にまとめた。また Z 軸上の変位によって発生する光路長差 L_Z の発生においては、平均値 \pm 1 nm の安定性を得るために例えば光源である半導体レーザの波長 λ が 790 nm、信号周期 D が 138 nm の場合、式(1-4-1)に基づき $L_Z \leq 0.015$ mm を目標として、提案した格子干渉計の実装時に検証することにした。

Table 1-4-2 開発する 3 次元エンコーダの主な目標スペック

	XY 軸上の変位検出	Z 軸上の変位検出
検出方式	格子干渉式	格子干渉式
ワーキングディスタンス	3 mm 以上	3 mm 以上
計測範囲	スケールサイズに依存	1 mm 以上
分解能	40 pm	0.2 nm
安定性	平均値 \pm 0.2 nm / h	平均値 \pm 1 nm / h
リニアリティ	平均値 \pm 0.2 nm / mm	-

Z 軸上の変位検出における格子干渉計を検討する上で重要なことは、 Z 軸上の変位検出において干渉計内の光路長が変化しないように、回折格子を用いて内部の光学系を構成することにある。これは大気中の温度や気圧、湿度の変化があっても、その影響を抑制させるだけでなく、温度変化による光源の波長変化が大きい安価な半導体レーザでも使用でき、さ

らに可干渉性の低い光源を使用しても広い計測範囲が得られるため、幅広い分野に応用できるといふ付加価値を生むからである。この原理提案方法を 3 次元計測の分野に残すことにより、特に進歩が著しい半導体製造装置において重要視される、ステージのピッチ、ロール、ヨーの姿勢制御の精度を上げ、露光や検査の精度を上げる役目を果たす。そして半導体技術の進歩は、将来的に個人用デバイス、サーバ、人工知能、次世代移動通信、自動運転、パワーデバイスによるクリーンエネルギーといった半導体を用いたアプリケーションの発展に寄与する。

1-5 本論文の構成

本研究は、既存の XY 軸上の変位検出における格子干渉計と新たに提案した Z 軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせた 3 次元エンコーダの実現性の検討と、新規に XZ 軸上の変位検出における格子干渉計を提案し、同格子干渉計を YZ 軸上の変位検出にも適用させた構成の 3 次元エンコーダの実現性の検討という 2 つのアプローチで研究し、それぞれの方法がどのような特徴を持ち、従来方法に対する優位性や将来に向けての課題について検証データをもとに結論を出す。

本論文は以下 5 つの構成で結論に導く。第 2 章では従来技術である XY 軸上の変位検出における格子干渉計について、特徴や性能について確認した結果を報告する。第 3 章では Z 軸上の変位検出における格子干渉計を新たに提案し、その原理と特徴について解説し、実装による基本性能を確認した結果を報告する。第 4 章では、新規に XZ 軸上の変位検出における格子干渉計を提案し、その原理の解説と、実装による基本性能を確認した結果を報告する。第 5 章では、第 2 章の XY 軸上の変位検出における格子干渉計と第 3 章の Z 軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせた 3 次元エンコーダと、第 4 章の XZ 軸上の変位検出における格子干渉計とそれを YZ 軸の変位検出にも適用させた場合の 3 次元エンコーダの性能について、今までの検証結果を基に比較を行うことで、各方法の優位性と課題について報告する。そして第 6 章では、本研究で得られた知見をまとめ、本論文の結論を出す。

第 2 章 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の確認

2-1 緒言

XY 軸上の変位検出における格子干渉計は従来技術として確立しているため、株式会社マダネスケール社製のレーザスケールを評価対象として取り上げ、その性能の確認結果について報告する。本格子干渉計は、2007 年に特許^[51]が公開されている。2 次元スケールも同社の反射型回折格子スケールを使用した。

本章では、2-2 節で XY 軸上の変位検出における格子干渉計の原理について説明し、2-3 節では格子干渉計の実装例を示し、2-4 節では安定性、内挿精度、2 次元スケールのリニアリティや正規直交性を確認した結果を示し、2-5 節の結言で 3 次元エンコーダの XY 軸上の変位検出部として基本性能が得られているか結論を出す。

2-2 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の原理

Fig. 2-2-1 に XY 軸上の変位検出における格子干渉計の光学系の原理図を示す。同原理図は、Y 軸方向からの X 軸上の変位検出における格子干渉計を示し、2 次元スケールは、XZ 平面に対し垂直に配置され、2 次元スケールの X 軸上の変位量を検出する。

光源にはマルチモードの半導体レーザを使用し、波長は 790 nm である。光源から出射されたビームは、偏光ビームスプリッタ PBS(X)によって S 偏光成分と P 偏光成分のビームに分割され、2 次元スケールに入射される。この S 偏光成分と P 偏光成分のビームは、2 次元スケールによって回折し、 $\lambda/4$ 位相板の裏に全反射ミラーが施されたミラー付 $\lambda/4$ 位相板に入射される。Fig. 2-2-2 に X 軸方向から示した YZ 面上の配置図を示すが、2 つの回折光は PBS(X)を通過せず、入射光と回折光は XZ 平面上に光路が重ならないように XZ 平面上から角度 θ 傾けて配置する。ミラー付 $\lambda/4$ 位相板によって反射された 2 つの回折光は、S 偏光成分が P 偏光成分に、P 偏光成分が S 偏光成分のビームとなり 2 次元スケールに戻され、2 回目の回折をする。この 2 回回折した 2 つのビームは、PBS(X)によって重ね合わせられ、受光部に向かう。この受光部は、 $\lambda/4$ 位相板と無偏光ビームスプリッタである BS と 2 つの PBS と 4 つの受光素子で構成される。2 回回折した 2 つビームは、互いに偏光軸が直交する P 偏光成分と S 偏光成分であるため、そのままでは干渉はしない。そこで $\lambda/4$ 位相板によって右回りと左回りの円偏光成分の重ね合わせられたビームとして、BS によって 2 分割される。2 分割された右回りと左回りの円偏光成分の重ね合わせられたビームの一方は、PBS により特定の角度の偏光成分同士の干渉光を取り出し、受光素子 X 0°と受光素子 X 180°によって受光される。またもう一方のビームも、同様に PBS により特定の角度の偏光成分同士の干渉光を取り出し、受光素子 X 90°と受光素子 X 270°によって受光する。ここで各受光素子が受光する干渉光は、2 次元スケールの X 軸上の回折格子によって左右それぞれで 2 回の

回折がされているため、左側の回折光で $-2\mathbf{Kx}$ 右側の回折光で $+2\mathbf{Kx}$ の位相が乗じられる。ここで \mathbf{K} は回折格子の波数ベクトル $2\pi/d$ であり、 d は 1 格子ピッチ、 \mathbf{x} は回折格子の検出方向の位置ベクトルを示す。したがって干渉光は、回折格子が 1 格子ピッチ分だけ X 軸上を移動することで 4 回明暗を繰り返すことになる。回折格子に入射するビームの時間変動成分を除いた複素振幅 \mathbf{E} は次式で示せる。

$$\mathbf{E} = \exp \{ i (\mathbf{kr}) \} \quad (2-2-1)$$

ここで \mathbf{k} はビームの波数ベクトル $2\pi/\lambda$ であり、 λ はビームの波長、 \mathbf{r} は光路上の位置ベクトル、 i は虚数単位である。したがって左側の回折光の複素振幅 \mathbf{E}_{-1} は次式で示せる。

$$\mathbf{E}_{-1} = \exp \{ i (\mathbf{kr} - 2\mathbf{Kx} + \Phi_1) \} \quad (2-2-2)$$

また右側の回折光の複素振幅 \mathbf{E}_1 は次式となる。

$$\mathbf{E}_1 = \exp \{ i (\mathbf{kr} + 2\mathbf{Kx} + \Phi_2) \} \quad (2-2-3)$$

したがって干渉光の強度 I は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} I &= (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_{-1})(\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_{-1})^* \\ &= 2 + 2 \cos(4\mathbf{Kx} + \Phi) \end{aligned} \quad (2-2-4)$$

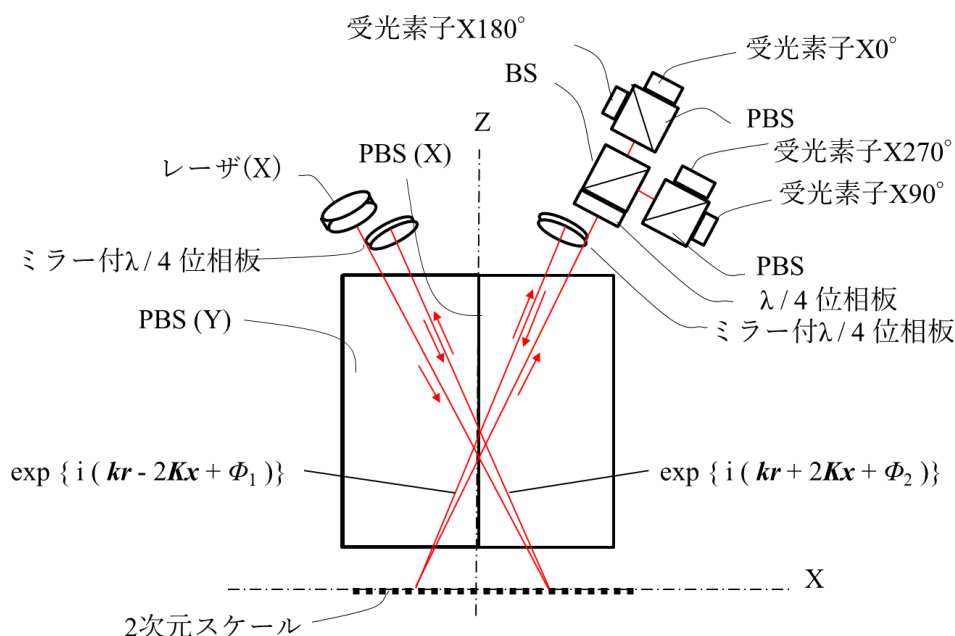


Fig. 2-2-1 X 軸上の変位検出における格子干渉計の原理図

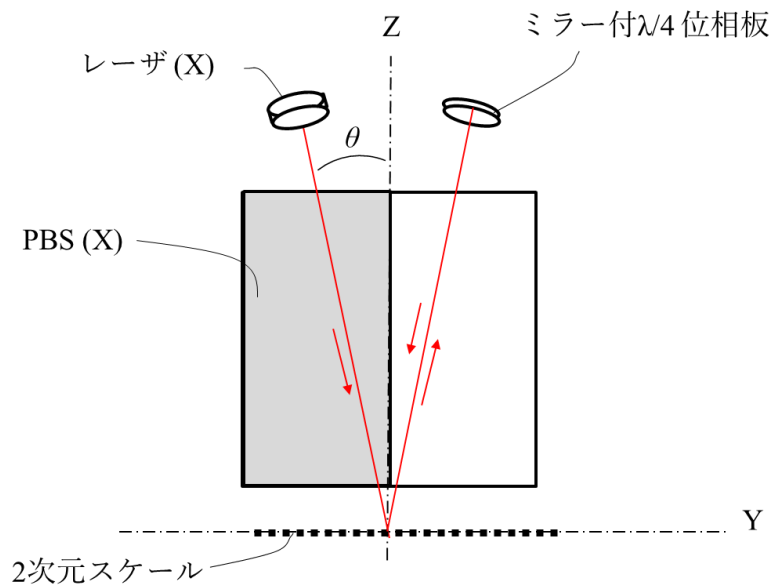


Fig. 2-2-2 X 軸上の変位検出における格子干渉計の原理図

ここで Φ_1 と Φ_2 は初期位相であり，回折格子の移動による位相に関係が無いいため $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ とする．レーザスケールの場合，二次元スケールの1格子ピッチが 1000 nm であるので，1/4 である 250 nm 周期の干渉信号を得ることになる．受光素子 X 180°は，PBS によって光学的に干渉信号の位相が受光素子 X 0°に対し 180°ずれており，受光素子 X 90°と受光素子 X 270°は，PBS を回転させることで，受光素子 X 0°に対し 90°と 270°位相をずらした信号が得られる．これは二次元スケールの移動方向を判別するのに有効であるだけでなく，受光素子 X 0°と受光素子 X 180°の差動信号と，受光素子 X 90°と受光素子 X 270°の差動信号を得ることで，干渉信号の DC (直流)成分のキャンセルが可能となり，干渉強度の変化の影響を受けにくい高精度な位相情報の検出に貢献している．

本格子干渉計は，PBS(X)でビームが分割されてから再び PBS(X)で重ね合わされるまでの左右の光路長差は，可干渉性の低いマルチモードの半導体レーザを使用することで，干渉信号出力を見ながら，数マイクロメートルレベルで等しくなるように調整することができ，使用環境の温度変化による光源の波長変化や，気圧や湿度の変化による空気の屈折率の変化の影響は，ほぼキャンセルされることになり，長時間計測における安定性も優れている．

Fig. 2-2-3 は，Z 軸方向からの X 軸上の変位検出における格子干渉計と Y 軸上の変位検出における格子干渉計の配置を示す．Y 軸上の変位検出における格子干渉計は，X 軸上の変位検出における格子干渉計に対し，Z 軸を中心に 90°回転して配置されており，検出原理としては X 軸上の変位検出における格子干渉計と同じであるため説明を省略する．

XY 軸上の変位検出には，X 軸上の変位検出における格子干渉計と Y 軸上の変位検出における格子干渉計から得られる単位時間当たりの位相情報を変位情報に変換する必要がある．

Fig. 2-2-4 に位相情報の処理回路のブロック図を示す.

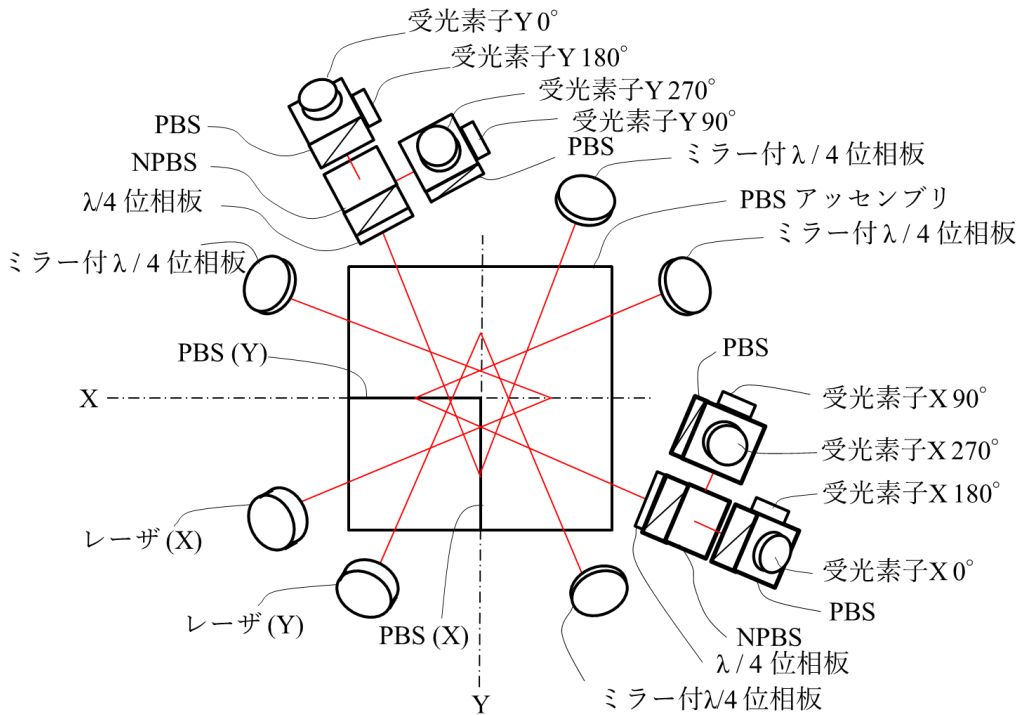


Fig. 2-2-3 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の原理図

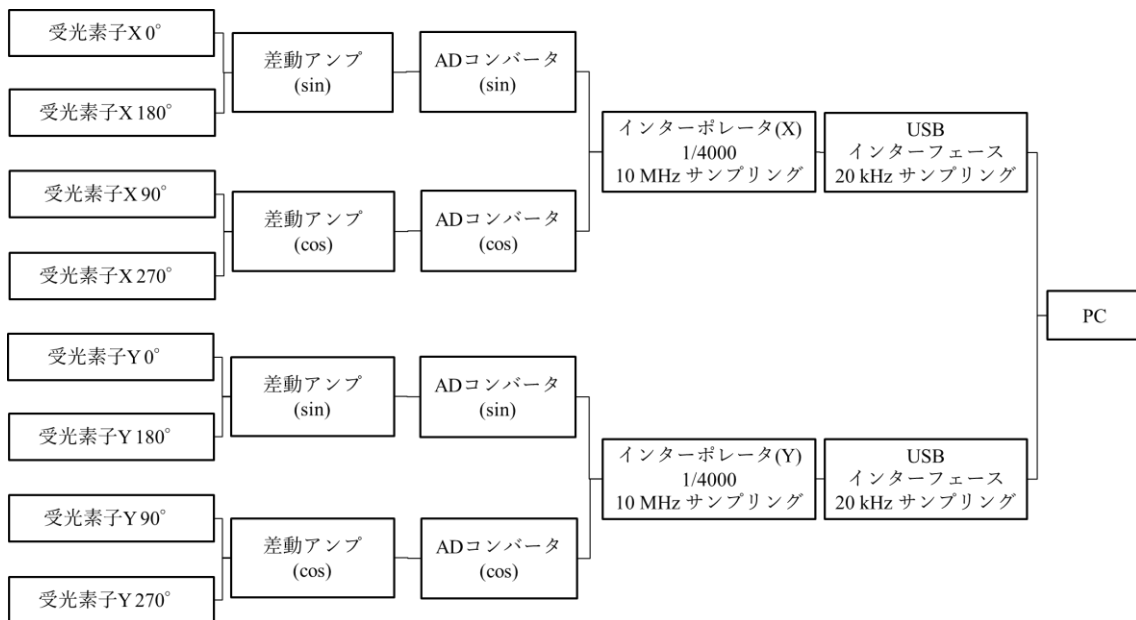


Fig. 2-2-4 位相情報の処理回路のブロック図

各受光素子で受光した干渉信号は、位相 0°と 180°, 位相 90°と 270°を差動アンプによって差動信号となる。その後 AD(アナログデジタル)コンバータによってアナログの波形をデ

デジタルに変換する。内挿回路であるインターポレータでは、回折格子の変位換算で 1 周期 250 nm の干渉信号を例えば 4000 内挿することで、分解能 $250 \text{ nm} / 4000 = 62.5 \text{ pm}$ の XY 軸上の変位検出を可能にする。さらにこの内挿回路では、干渉信号の DC 成分や \sin と \cos の振幅差や位相差を分解能レベルでデジタル的にリアルタイム補正をかけ、100 ns 毎の干渉信号の位相変化を累積加算させた変位情報として USB (ユニバーサルシリアルバス) インターフェースによって PC (パーソナルコンピュータ) に出力される。これらの計算処理は、FPGA (フィールドプログラマブルゲートアレイ) によって高速処理されるため、時間遅延は 0.005 ms 以下となりリアルタイム性も十分にある。

2-3 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の実装

実装された XY 軸上の変位検出における格子干渉計の検出ヘッドを Fig. 2-3-1 に示す。1 格子ピッチ 1000 nm の 2 次元スケールと 4000 内挿の内挿回路と組み合わせられ、分解能 62.5 pm を得ている。PBS(X)と PBS(Y)を構成する光学部品は石英ガラスを使用し、その石英ガラス上にミラー付 $\lambda/4$ 位相板が接着される。ワーキングディスタンスは 2.5 ~ 3.5 mm となり、Z 軸上の移動に対する許容も持つ。光源には $\lambda = 790 \text{ nm}$ のマルチモード半導体レーザを 2 本使用し、XY それぞれ 1.8mW ずつ光ファイバで入力することで、格子干渉計自体の温度上昇を控え、長時間による安定性を高めるようにしてある。

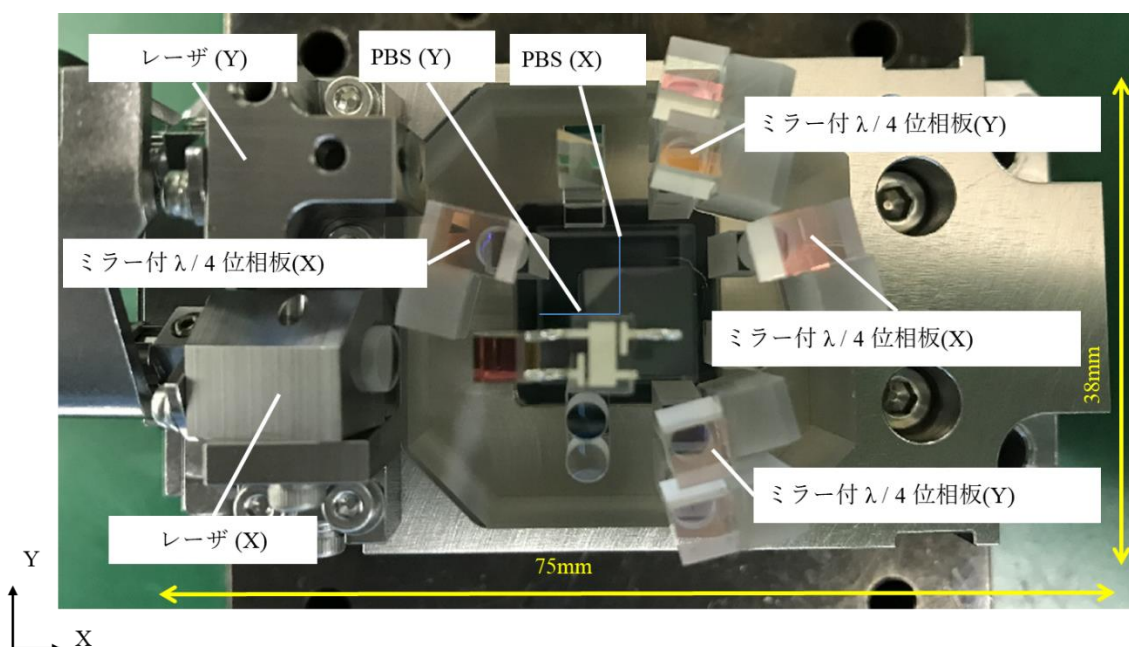


Fig. 2-3-1 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の実装

本格子干渉計の2次元スケールに入射するビームの位置と入射角を Fig. 2-3-2 に示す。入射角と1次回折光の回折角は、ほぼ等しくすることで、2次元スケールのZ軸上の移動に対し回折光のずれを小さくできるメリットがある。したがって入射角 θ_i と回折角 θ_d は、1格子ピッチ 1000 nm と光源の波長 790 nm で決定され、約 23.3°になる。一方、格子干渉計のサイズは、2次元スケールの表面のたわみの影響を考えると、なるべく小さくした方が望ましい。2次元スケールの基材は、高精度に研磨されたガラスを使用するが、その表面の精度は1 mm あたり 1 nm である。つまり2次元スケールがX軸上を移動したときに、往復で2回回折をする本格子干渉計の互いに干渉するビームの光路長差は、2次元スケールのX軸上の移動において、1 mm あたり $2 \cdot 2 \cdot 1 \text{ nm} / \cos 23.3^\circ = 4.4 \text{ nm}$ 発生することになる。本格子干渉計の信号周期は、250 nm であるので、この誤差は $250 \cdot 4.4 / 790 = 1.39 \text{ nm}$ として、2次元スケールのリニアリティに影響してしまう。したがって2次元スケールに入射する2つのビームの入射位置 P1 と P2 は極力1点に近づけるよう小型に設計すべきで、リニアリティを優先する場合、ミラー等で反射させ P1 と P2 を1点にする場合もある。また本格子干渉計では2次元スケールの1格子ピッチを 1000 nm で検討しているが、1格子ピッチを大きくすることで回折角を小さくして、2次元スケールに入射する2つのビームの位置を近づけることもできる。この場合、信号周期も大きくなるので、設計目標とする分解能とリニアリティのトレードオフになる。

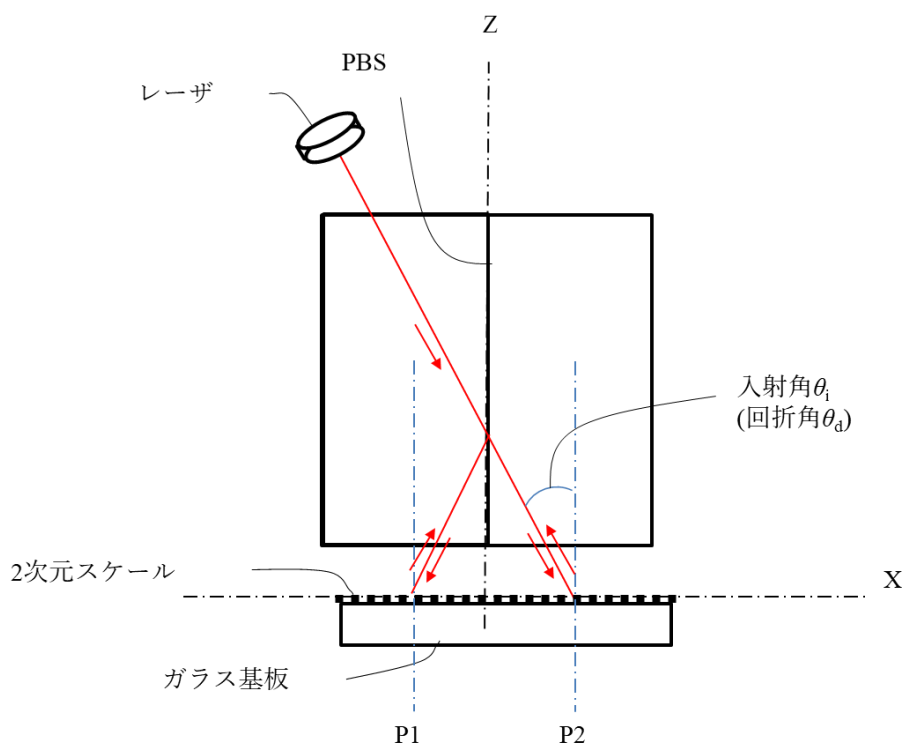


Fig. 2-3-2 2次元スケールに入射するビームの位置と入射角

2-4 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の検証

2-4-1 安定性の確認

安定性の計測システムを Fig. 2-4-1-1 に示す。20 ± 0.05°C にコントロールされた温度コントロールボックス内で、XY 軸上の変位検出における格子干渉計と 2 次元スケールを除振台の上に置いた固定ブロックによって固定し安定性を確認した。使用したインターポレータは 4000 分割であり、格子干渉計の信号周期が 250 nm なので計測分解能は、62.5 pm になる。サンプリング周波数は、50 Hz で 60 min 計測し 1 s ごとの平均化したデータを取得した。Fig. 2-4-1-2 に X 軸上の変位検出における格子干渉計の安定性、Fig. 2-4-1-3 に Y 軸上の変位検出における格子干渉計の安定性の計測結果を示す。結果は X 軸上の変位検出における格子干渉計で平均値 ± 0.1 nm、Y 軸上の変位検出における格子干渉計で平均値 ± 0.2 nm であった。

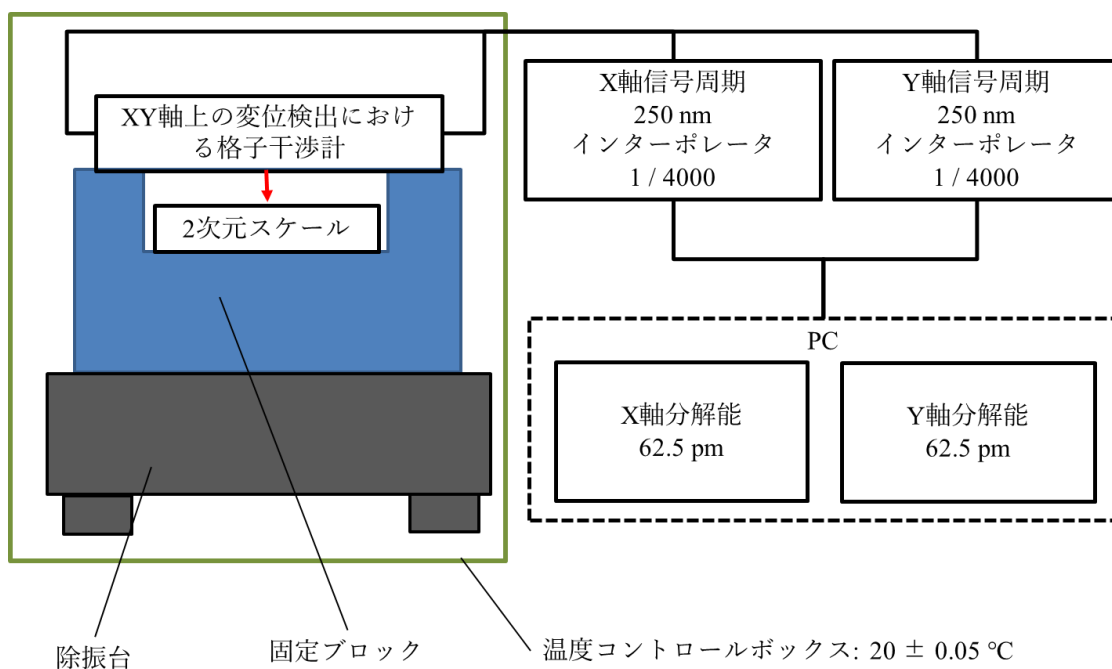


Fig. 2-4-1-1 安定性の計測システム

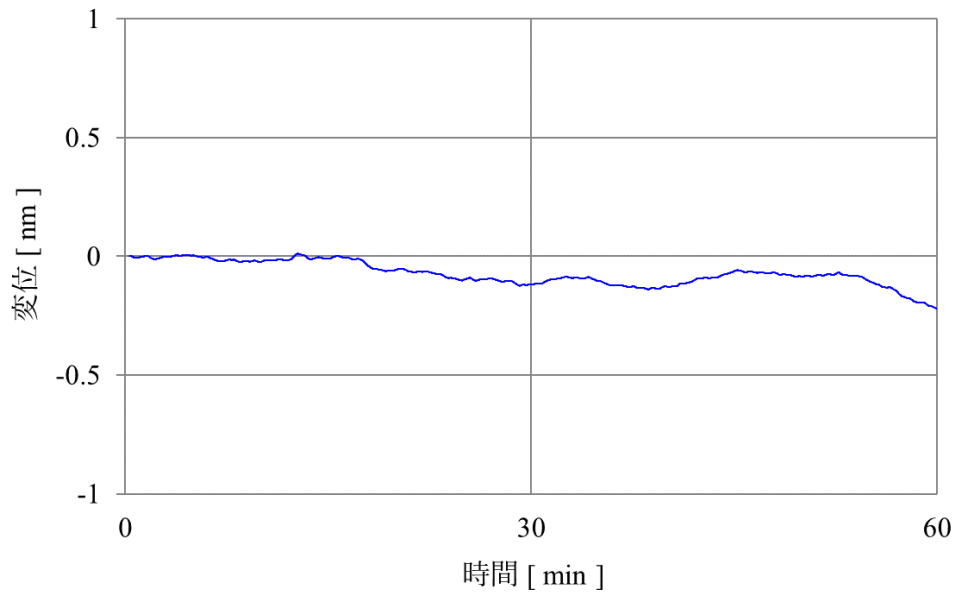


Fig. 2-4-1-2 X 軸上の変位検出における格子干渉計の安定性

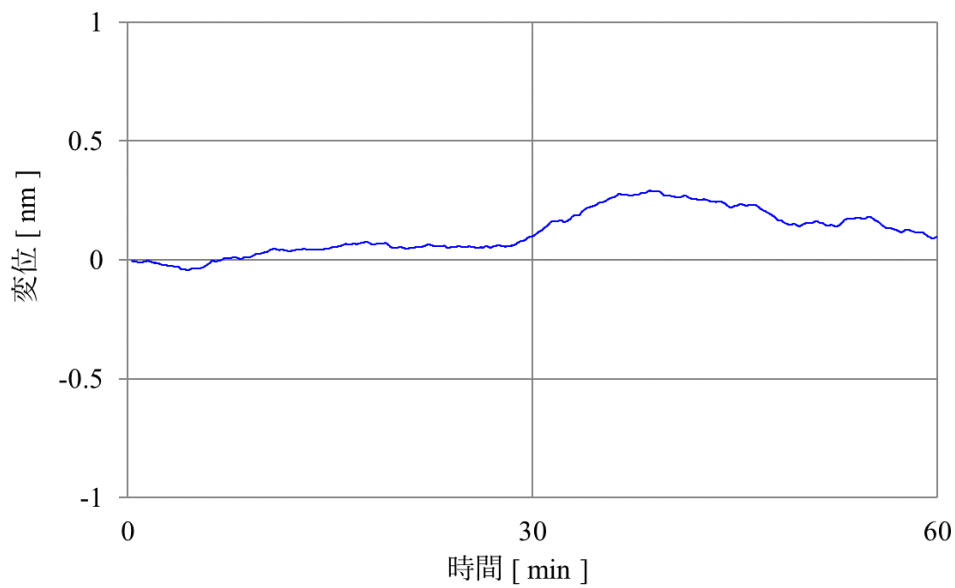


Fig. 2-4-1-3 Y 軸上の変位検出における格子干渉計の安定性

2-4-2 内挿精度の確認

内挿精度の確認に用いた装置の外観を **Fig. 2-4-2-1**, 構成図を **Fig. 2-4-2-2** に示す。ピエゾステージの上に 2 次元スケールの X 軸方向をピエゾステージの移動方向に合わせた。また 2 次元スケールの X 軸方向は、光波干渉計の計測ライン上に配置し、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の X 軸上の内挿精度を計測した。Y 軸上の内挿精度の計測は、2 次元スケールの Y 軸方向と本格子干渉計の Y 軸をピエゾステージの移動方向に合わせて 90°回転させて設置を行った。ピエゾステージは平行板バネの機構を採用しストロークは 3000 nm と

した。本計測のリファレンスは、He-Ne レーザを光源とした 12 倍のマルチパスのマイケルソン干渉計を用いた。計測対象である本格子干渉計は、左右のマルチパス干渉計によって挟み込むように置かれ、マルチパス干渉計の左右の光路長差が最も少ない位置で計測を行った。光波干渉計は空気の揺らぎの影響を受けるため、マルチパス干渉計を構成する部分はコンパクトにまとめられ、密閉することで空調の影響を受けにくくし、さらにフレームはスーパーインバー材を使い、1 回の計測は 20 s 以内で行われた。内挿回路であるインターポレータは 16384 内挿を使用したため、マルチパス干渉計の分解能は、信号周期 53 nm を 16384 で割ることで 3.2 pm となった。一方、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の信号周期は 250 nm であるため、分解能は同じく 16384 で割ることで 15.3 pm となった。内挿による誤差は、 $n =$ 整数とすると必ず信号周期の n 次で発生するので、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の信号周期に対し、マルチパス干渉計の信号周期を十分に小さくすることで、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の干渉信号の DC オフセットで発生する 1 次の 250 nm 周期の誤差や、sin 信号と cos 信号の位相と信号のゲイン比で発生する 2 次の 125 nm 周期の誤差と、マルチパス干渉計の内挿の誤差を分離できるようにした。またこの計測装置に含まれる誤差は Table 2-4-2-1 のとおりである。

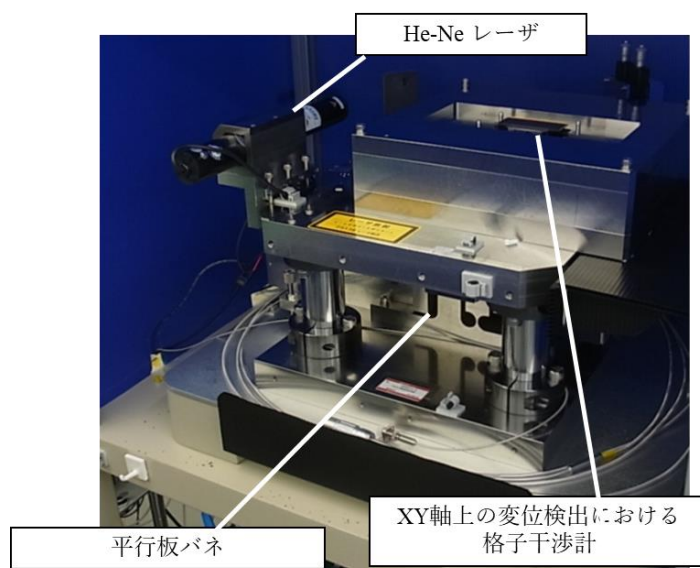


Fig. 2-4-2-1 内装精度計測装置外観

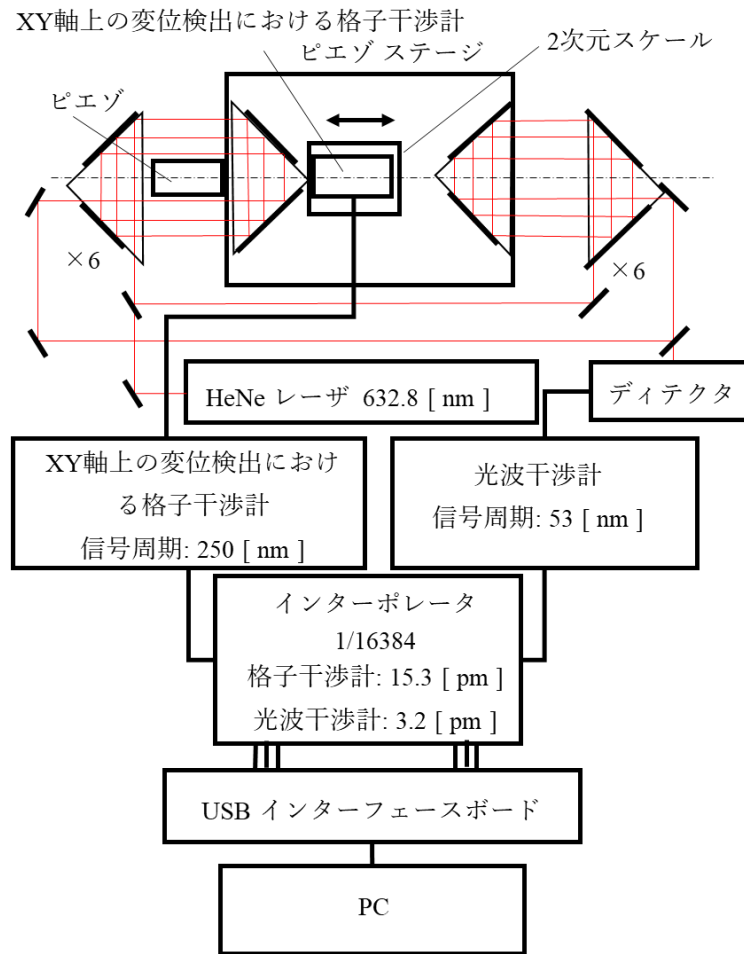


Fig. 2-4-2-2 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の内挿精度計測装置の構成

Table 2-4-2-1 内挿精度の計測に含まれる誤差

項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
XY 軸上の変位検出における格子干渉計の ノイズ(LPF 100 Hz)	A	正規分布	4 pm
光波干渉計の内挿誤差	B	一様分布	2.9 pm
計測ラインからのずれによるアッペ誤差	B	一様分布	0.9 pm
合成			5 pm

Fig. 2-4-2-3 に X 軸上の変位検出における内挿精度の結果を示す。信号周期 250 nm 内に周期的に発生する誤差は 14.2 pm であった。Fig. 2-4-2-4 に Y 軸上の変位検出における内挿精度の結果を示す。信号周期 250 nm 内に周期的に発生する誤差は 14.6 pm であった。

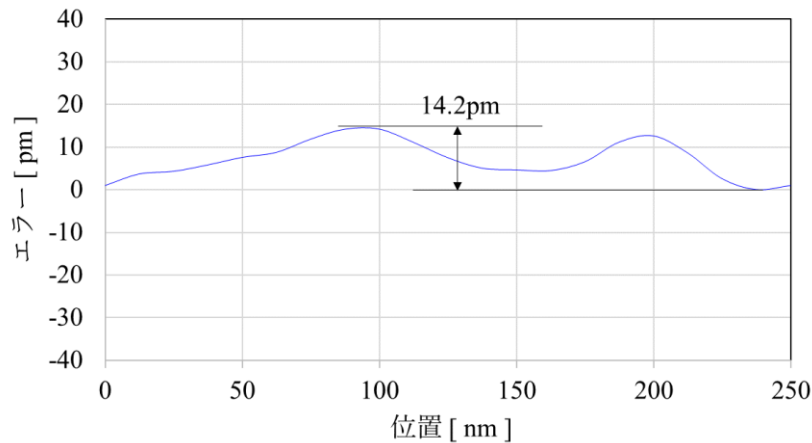


Fig. 2-4-2-3 X 軸上の変位検出における内挿精度の計測結果

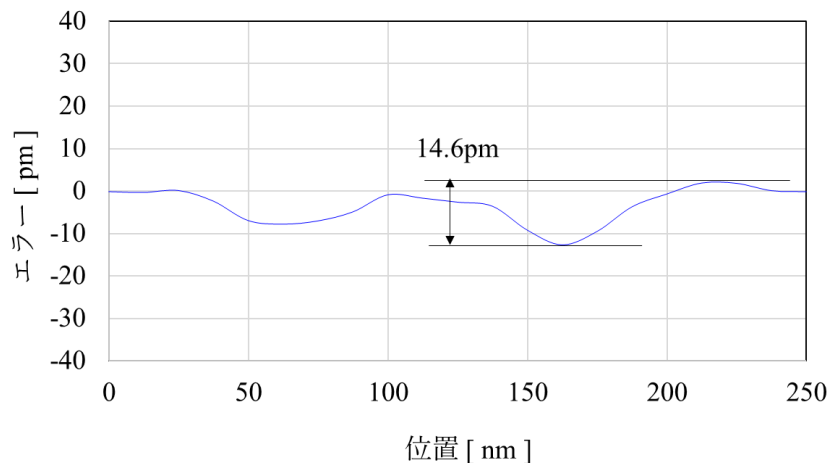


Fig. 2-4-2-4 Y 軸上の変位検出における内挿精度の計測結果

2-4-3 2次元スケールの精度とリニアリティの確認

2次元スケールの精度の確認は、Fig. 2-4-3-1 に示す精度確認システムで行った。XY ステージは、Y ステージの上に X ステージを乗せたリニアモータ制御のエアステージを用い、リファレンスは光波干渉計とした。光波干渉計の信号周期は 316.4 nm であり、インターポレータによって 4000 内挿することで 79.1 pm の分解能となる。2次元スケールは、X ステージ上に置き、光波干渉計の計測ライン上に合わせて設置した。2次元スケールの回折格子ピッチは 1000 nm、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の信号周期は、2-2 節で説明したものと同一 250 nm で、インターポレータによって 4000 内挿することで、分解能を 62.5 pm とした。

計測は、Y 軸上に関しては 6 mm 間隔のステップ送りで 50 ライン計測し、計測範囲は 300 mm とした。X 軸上の移動に関しては 10 mm/s の等速度で、サンプリング周波数は 1 kHz、計測範囲は 400 mm とした。光波干渉計の補正は、計測開始時の温度、湿度、気圧の測定結

果を適用し、リアルタイムでの補正は行わなかった。

一方、2次元スケールの1 mm 範囲における短区間のリニアリティの計測は、X 軸上の変位検出側のみについて参照格子干渉計を X 軸上の変位検出における格子干渉計の計測ラインに合わせて配置し、参照格子干渉計との比較計測を行った。この時のステージ速度は0.1 mm / s で、サンプリング周波数は750 Hz、参照格子干渉計の信号周期は、138 nm、分解能は34.5 pm とした。

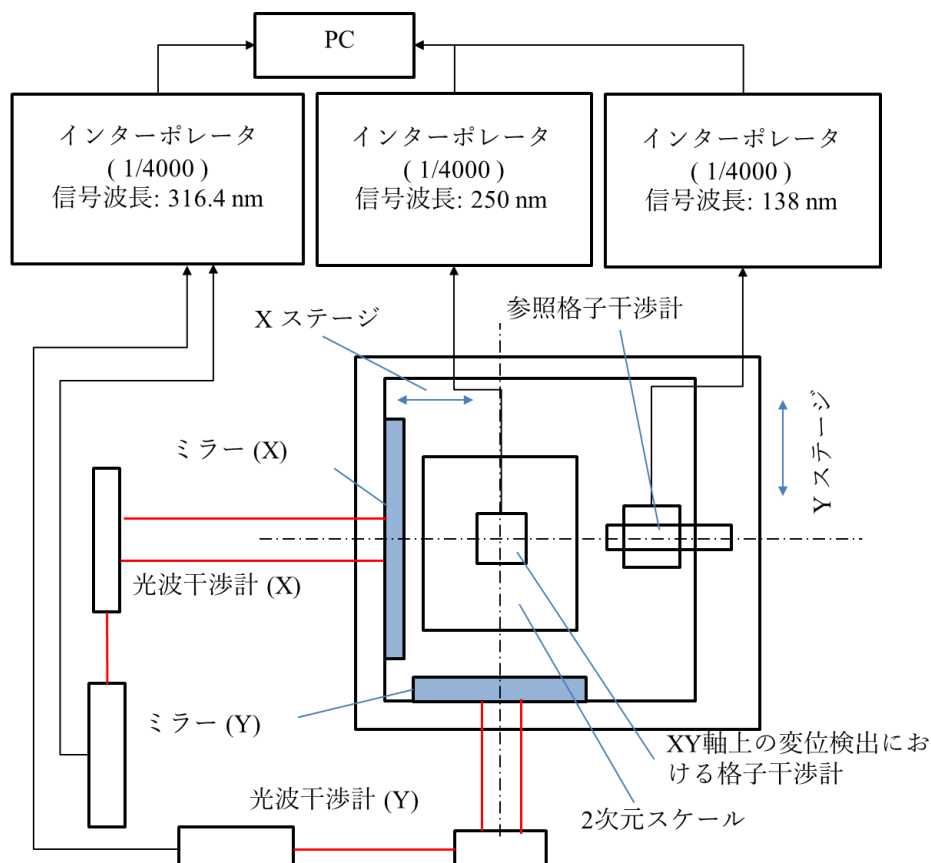


Fig. 2-4-3-1 2次元スケールの精度確認システム

2次元スケールの精度確認システムの X 軸上の変位計測誤差を Table 2-4-3-1 に、Y 軸上の変位計測誤差を Table 2-4-3-2 に示す。また2次元スケールの1 mm 範囲における短区間のリニアリティ計測における変位計測誤差を Table 2-4-3-3 に示す。X 軸上の変位検出における格子干渉計による2次元スケールの精度計測結果を Fig. 2-4-3-2 に、Y 軸上の変位検出における格子干渉計による2次元スケールの精度計測結果を Fig. 2-4-3-3 に示す。

有効エリアである X 軸 400 mm、Y 軸 300 mm の2次元スケールの精度は、X 軸上の変位計測で 0 ± 260 nm、Y 軸上の変位計測で 0 ± 160 nm であった。ここから求められる2次元スケールの X 軸上の変位計測に対する Y 軸上の格子ベクトルの直交性は、X 軸上の有効長 400 mm と Y 軸上の精度から求められ $\sin^{-1}(160 \text{ nm} / 400 \text{ mm}) = 0 \pm 0.08''$ となる。一方、2次元ス

ケールの Y 軸上の変位計測に対する X 軸上の格子ベクトルの直交性は, Y 軸上の有効長 300 mm と X 軸上の精度から求められ $\sin^{-1}(260 \text{ nm} / 300 \text{ mm}) = 0 \pm 0.18''$ となる. したがって 2 次元スケールの正規直交性は, 最大で $90^\circ \pm 0.26''$ であると考えられる. また 2 次元スケールの直交度の検証に関する詳細は, 付録にて解説する.

Table 2-4-3-1 2次元スケールの精度確認における X 軸上の変位計測誤差

誤差項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
X 軸方向計測時の Y 軸方向の光波干渉計 ミラーの面精度	B	一様分布	19.1 nm
計測ラインからのずれによるアッペ誤差	A	正規分布	1.7 nm
光波干渉計の安定性	A	正規分布	13.3 nm
X 軸上の変位検出における格子干渉計の 安定性	A	正規分布	0.1 nm
合成	23.3 nm		

Table 2-4-3-2 2次元スケールの精度確認における Y 軸上の変位計測誤差

誤差項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
Y 軸方向計測時の X 軸方向の光波干渉計 ミラーの面精度	B	一様分布	45.6 nm
計測ラインからのずれによるアッペ誤差	A	正規分布	1.7 nm
光波干渉計の安定性	A	正規分布	3 nm
Y 軸上の変位検出における格子干渉計の 安定性	A	正規分布	0.1 nm
合成	45.7 nm		

Table 2-4-3-3 2次元スケールのリニアリティ確認における変位計測誤差

項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
X 軸上の変位検出における格子干渉計の 安定性	A	正規分布	0.1 nm
参照格子干渉計のリニアリティ	B	一様分布	0.29 nm
計測ラインからのずれによるアッペ誤差	A	正規分布	0.17 nm
合成	0.4 nm		

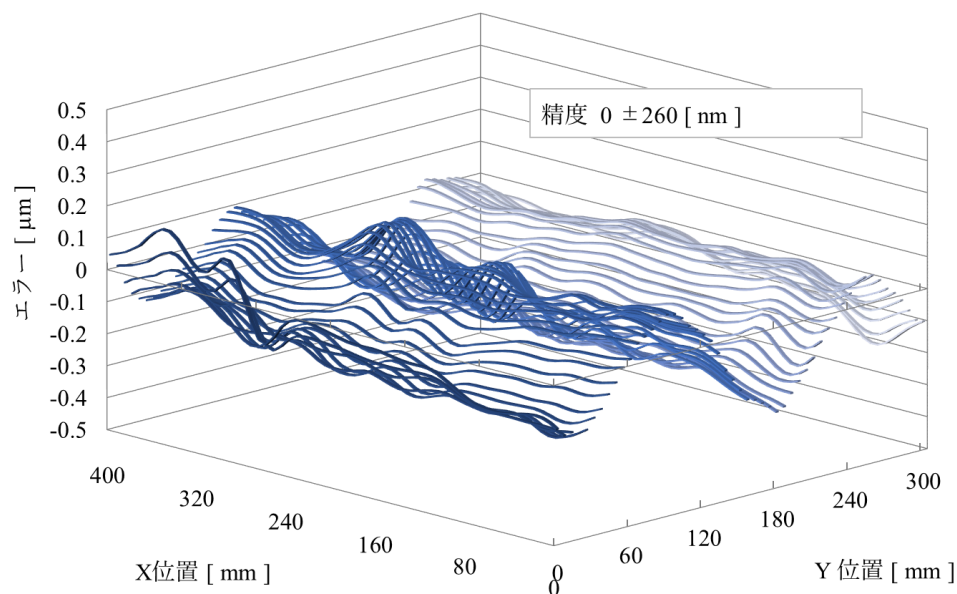


Fig. 2-4-3-2 X軸の格子干渉計による2次元スケールの精度計測結果

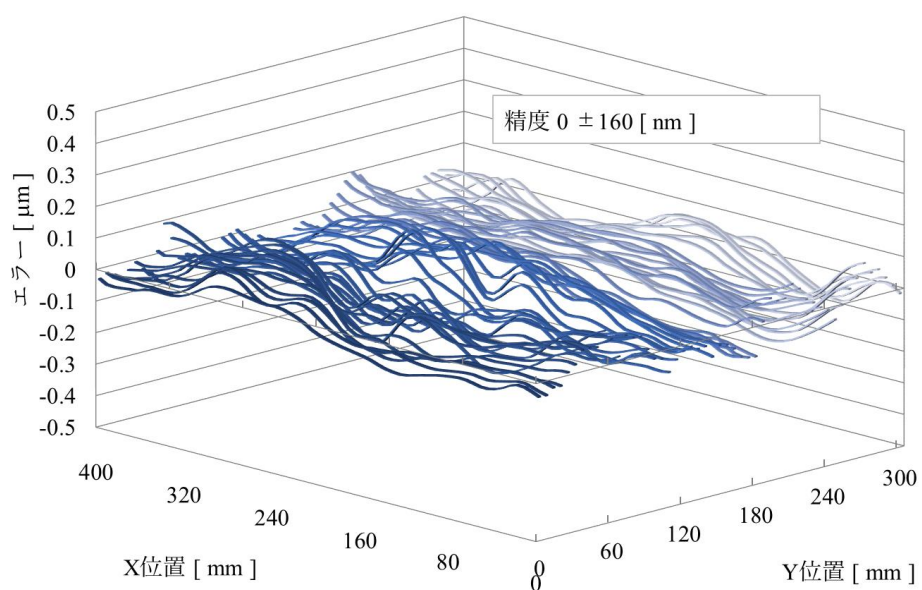


Fig. 2-4-3-3 Y軸の格子干渉計による2次元スケールの精度計測結果

参照格子干渉計とX軸上の変位検出における格子干渉計の比較計測による2次元スケールの短区間のリニアリティ計測結果を **Fig. 2-4-3-4** に示す。計測結果は5 mmにおいて、平均値 ± 0.3 nmで、リニアリティは平均値 ± 0.2 nm/mmであった。

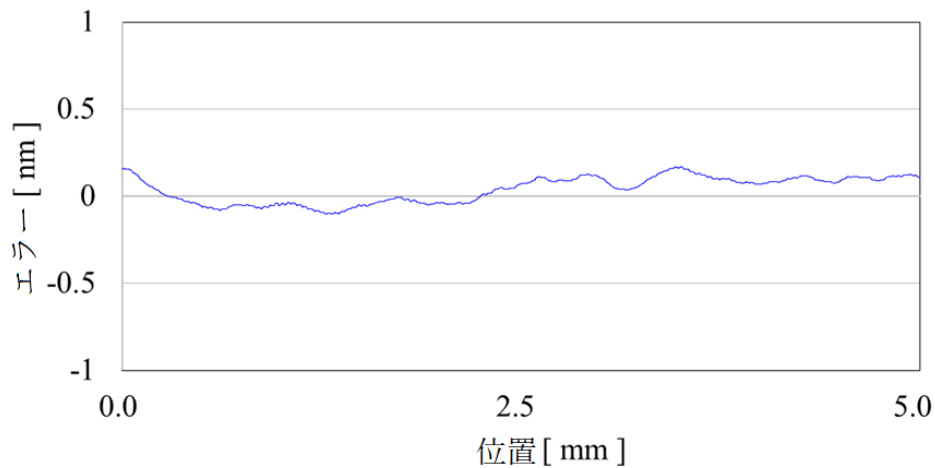


Fig. 2-4-3-4 参照格子干渉計による2次元スケールのリニアリティ計測結果

2-5 結言

本章では3次元エンコーダを構成するXY軸上の変位検出における格子干渉計の基本性能を確認するため、マグネスケール社製のレーザスケールと2次元スケールを用いて、安定性、内挿精度、リニアリティ、精度、正規直交性を確認した。その結果をまとめてTable 2-5-1に示す。

格子干渉計のノイズに関しては、既に同システムで計測した結果が、藤森徹博士による「NC工作機械の高精度運動制御のためのリニアスケールシステムに関する研究」^[52]で報告されており、その値を引用すると、4kHzのローパスフィルタで平均値 ± 0.2 nmである。XY軸上の変位検出における格子干渉計は、空気の揺らぎの影響をほとんど受けることが無く、長時間の安定性は平均値 ± 0.2 nm/hが得られていることを確認した。参照格子干渉計による2次元スケールとの比較計測を行った短区間のリニアリティの計測では、平均値 ± 0.2 nm/mmが確認された。一方、2次元スケールの正規直交性については、精度確認結果から $90^\circ \pm 0.26''$ と算出されており、格子干渉計の安定性と相まって2次元スケールは、将来正規直交性の確認の基準器としても使用できる可能性を秘めていることが確認された。

以上の結果から本XY軸上の変位検出における格子干渉計は、3次元エンコーダを実現させる上で、XY軸上の変位検出における基本性能が十分に得られていると判断した。

Table 2-5-1 XY 軸上の変位検出における格子干渉計の確認結果のまとめ

確認項目		結果
信号周期	X, Y	250 nm
分解能 (16384 内挿)	X, Y	15.3 pm
ワーキングディスタンス	Z	2.5 ~ 3.5 mm
計測の範囲	Z	1 mm
格子干渉計のノイズ	X	平均値± 0.2 nm / 4 kHz LPF
	Y	平均値± 0.2 nm / 4 kHz LPF
格子干渉計の安定性	X	平均値± 0.1 nm / h
	Y	平均値± 0.2 nm / h
格子干渉計の内挿精度	X	14.2 pm / 250 nm
	Y	14.6 pm / 250 nm
2次元スケールの精度 400 × 300 mm	X	0 ± 260 nm
	Y	0 ± 160 nm
2次元スケールのリニアリティ (平均値± 3σ)	X	平均値± 0.2 nm / mm
2次元スケールの正規直交性		90° ± 0.26" (0.001 mrad)

第3章 Z軸上の変位検出における格子干渉計の開発

3-1 緒言

本章では、非接触で被計測物からの反射光を利用して Z 軸上の変位検出を格子干渉計において、0.2 nm 以下の検出分解能を達成させ、1 mm の検出範囲と 3 mm 以上のワーキングディスタンスを有し、さらに大気中でも安定した変位検出をする原理を提案し^[53]、最終的に 2 次元スケール表面の Z 軸上の変位検出ができることを確認する。これにより本章で開発した Z 軸上の変位検出における格子干渉計と、既存の XY 軸上の変位検出の格子干渉計と組み合わせた 3 次元エンコーダの実現に繋げることを目的とする。

3-2 Z 軸上の変位検出における格子干渉計の提案

Z 軸上の変位検出における格子干渉計を構成するうえで重要なことは、被計測物の Z 軸上の移動があっても干渉計内の光路長が変化しないように、回折格子を用いて内部の光学系を構成することにある。これは第 2 章で解説したように、大気中の温度や気圧、湿度の変化があっても、その影響を抑制させるだけではなく、温度変化による光源の波長変化が大きい安価な半導体レーザーを使用した場合でも安定した変位検出を実現するためである。

本開発で提案した Z 軸上の変位検出における格子干渉計の原理を Fig. 3-2-1 に示す。本原理図は、Y 軸方向から、被計測物となるターゲットミラーの Z 軸上の変位を検出する格子干渉計を示している。レーザー(光源)には中心波長 781 nm のマルチモードの半導体レーザーを用いることを前提にした。レーザーから出射したビームは、偏光ビームスプリッタ PBS によって S 偏光成分と P 偏光成分のビームに 2 分割され、直進した P 偏光成分のビームは、参照ミラーとミラーで反射され、ホログラム格子によって回折される。ホログラム格子は透過型のボリュームタイプホログラム^[54]であり、1 格子ピッチが 552 nm としたため、ビームの入射角を 45°にすると回折角も 45°となり、ブラッグ条件 $2d \sin \theta = n\lambda$ を満たす。ここで d は 1 格子ピッチ、 θ は入射角、 n は実数、 λ は光源の波長であり、高い回折効率で回折させることができる。ホログラム格子によって回折されたビームは、ミラーと参照ミラーで反射され $\lambda/4$ 位相板を通過し直角ミラーによって戻される。この際、戻りのビームは $\lambda/4$ 位相板を 2 回通過するためビームの偏光成分は、P 偏光成分から S 偏光成分に変換される。したがって PBS まで戻ったビームは、光源側に戻らない。さらにこのビームはホログラム格子によって 2 回回折されているが、ホログラム格子は他の光学部品と同様に固定されているため、回折光の位相の変化は生じない。つまりこの左側の光路を本格子干渉計の参照光とする。次に PBS によって 2 分割された右側の S 偏光成分のビームは、被計測物となるターゲットミラーで反射され、さらに、ミラーによって反射された後、ホログラム格子で回折され、ターゲットミラーで再び反射され、直角ミラーによって戻される。この際、戻りのビームは

$\lambda/4$ 位相板を2回通過するためビームの偏光成分は、S 偏光成分から P 偏光成分に変換される。したがって PBS まで戻ったビームは、光源側に戻らない。この右側の光路を本格子干渉計の物体光とする。この2回回折した2つのビームは、PBSによって重ね合わせられ、受光部に向かう。この受光部は、 $\lambda/4$ 位相板と無偏光ビームスプリッタである BS と2つの PBS と4つの受光素子で構成される。

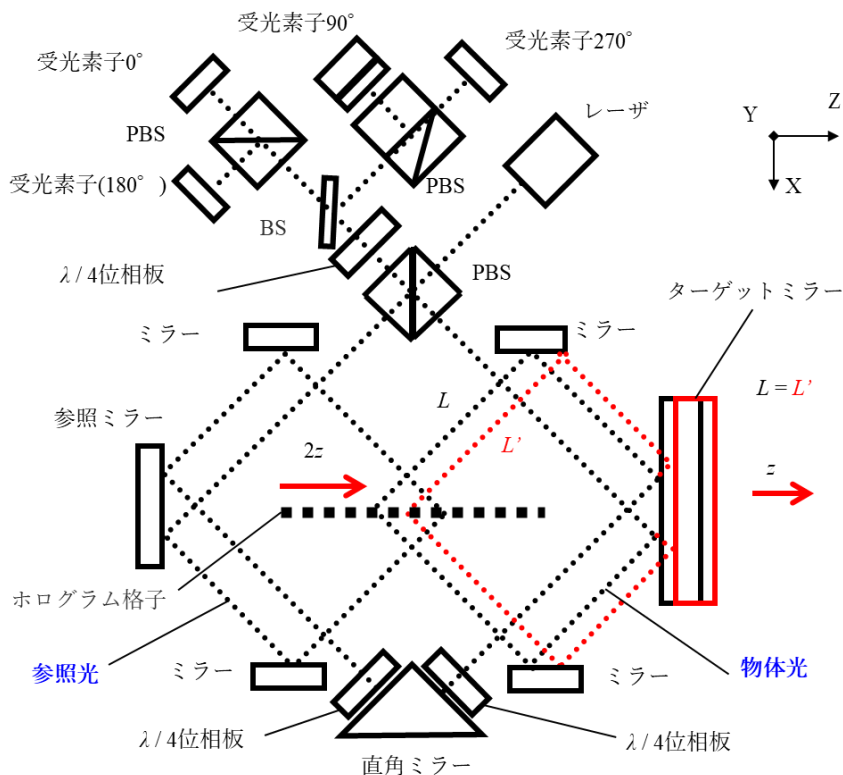


Fig. 3-2-1 Z軸上の変位検出における格子干渉計の原理

ここで物体光は、ターゲットミラーがZ軸上を移動することで、光路が赤点線のように平行移動する。Fig. 3-2-2 にターゲットミラーの移動に伴う光路の変化を示す。ホログラム格子はターゲットミラーに対し垂直になるように配置される。ターゲットミラーがZ軸上を z だけ移動するとホログラム格子上でビームが $2z$ 移動するが、光路長は $L'=L$ となり変化しない。つまり左側の物体光の光路長は、ターゲットミラーの移動に関係なく一定であり、中央の直角ミラーを使って左側の参照光との光路長と右側の物体光の光路長を調整する際に、可干渉性の低いマルチモードの半導体レーザーを使用することで、干渉信号出力を見ながら、光路長を数マイクロメートルレベルで等しくなるよう調整することができる。したがって使用環境の温度変化による光源の波長変化や、気圧や湿度の変化による空気の屈折率の変化の影響はほぼキャンセルされ、長時間で安定な計測を可能にする。

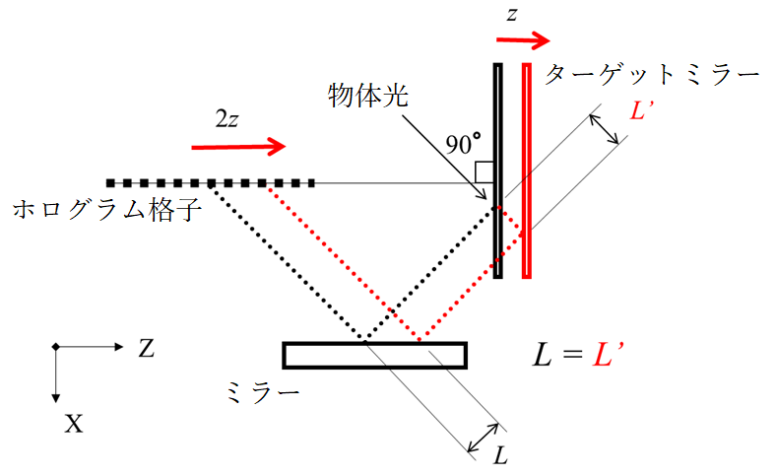


Fig. 3-2-2 Z軸上の変位検出における格子干渉計の原理

本格子干渉計の干渉信号は、ターゲットミラーがZ軸上を z だけ移動すると、物体光の位相は $4\mathbf{K}z$ 乗じられることになる。ここで \mathbf{K} はホログラム格子の波数ベクトル $2\pi/d$ であり、 d は1格子ピッチ、 z は回折格子の検出方向の位置ベクトルを示す。したがって干渉光は、ターゲットミラーがホログラム格子の1格子ピッチ分だけZ軸上を移動することにより4回明暗を繰り返すことになる。

回折格子に入射するビームの時間変動成分を除いた複素振幅 \mathbf{E} は次式で示せる。

$$\mathbf{E} = \exp \{ i(\mathbf{k}\mathbf{r}) \} \quad (3-2-1)$$

ここで \mathbf{k} はビームの波数ベクトル $2\pi/\lambda$ であり、 λ はビームの波長、 \mathbf{r} は光路上の位置ベクトル、 i は虚数単位である。したがって左側の参照光の複素振幅 \mathbf{E}_r は次式で示せる。ここで参照光にホログラム格子からの位相変化を乗じていないのは、参照ミラーが固定されて動かないため、ホログラム上のビームの移動も無いからである。

$$\mathbf{E}_r = \exp \{ i(\mathbf{k}\mathbf{r} + \Phi_1) \} \quad (3-2-2)$$

また右側の物体光の複素振幅 \mathbf{E}_o は次式となる。

$$\mathbf{E}_o = \exp \{ i(\mathbf{k}\mathbf{r} + 4\mathbf{K}z + \Phi_2) \} \quad (3-2-3)$$

したがって干渉光の強度 I は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} I &= (\mathbf{E}_o + \mathbf{E}_r)(\mathbf{E}_o + \mathbf{E}_r)^* \\ &= 2 + 2 \cos(4\mathbf{K}z + \Phi) \end{aligned} \quad (3-2-4)$$

ここで Φ_1 と Φ_2 は初期位相であり、回折格子の移動による位相に関係が無いいため $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ とする。したがって干渉信号の周期は、ホログラム格子の1格子ピッチが552 nmであ

るため、 $1/4$ である 138 nm となる。受光素子 0° は、PBS によって光学的に干渉信号の位相が受光素子 180° に対し 180° ずれており、受光素子 90° と受光素子 270° は、PBS を回転させることで、受光素子 0° に対し 90° と 270° 位相をずらした信号が得られる。これはターゲットミラーの移動方向を判別するのに有効であるだけでなく、受光素子 0° と受光素子 90° の差動信号と、受光素子 90° と受光素子 270° の差動信号を得ることで、干渉信号の DC 成分をキャンセルすることが可能となり、干渉強度の変化の影響を受けにくい高精度な位相情報の検出に貢献している。この干渉信号を第 2 章の XY 軸上の変位検出における格子干渉計で説明した内挿回路で 16384 分割することにより、分解能 8.4 pm という非常に高分解能な Z 軸上の変位検出が可能となる。内挿回路のフローに関しては、Fig. 2-2-4 と原理が同じであるため説明を省略する。

3-3 Z 軸上の変位検出における格子干渉計の実装

Z 軸上の変位検出における格子干渉計を実装する上で、事前検討した部位の略図を Fig. 3-3-1 に示す。実際は内部に使用したホログラム格子の 1 格子ピッチは 550 nm であり、光源に波長 790 nm のマルチモード半導体レーザを用いて、ターゲットミラーの入射角 θ_i は約 45° とした。またターゲットミラーの平面度は、2 次元スケールの基材同様に、高精度に研磨されたガラスを使用することを前提に、 1 mm あたり 1 nm を想定した。つまりターゲットミラーが Z 軸上を 1 mm 移動すると、2 つのビームの入射位置 P1 と P2 は、互いに X 軸上に沿って 1 mm 移動することになる。ターゲットミラーに 4 回入射する本原理では、この移動によって最大 $4 \cdot 2 \cdot 1\text{ nm} / \cos 45^\circ = 11.3\text{ nm}$ の光路長が発生することになる。本格子干渉計の信号周期は、 138 nm であるので、誤差として $138 \cdot 11.3 / 790 = 2\text{ nm}$ だけ Z 軸上の変位検出に対してリニアリティに影響してしまうことが事前に予測できる。この影響は、格子干渉計を構成する内部のミラーにも同様であり、特にミラー A とミラー B の研磨精度、ホログラム格子のガラス基板の平行度に関して十分な配慮が必要である。

もう一つの重要な点として、ミラー A とミラー B の平行度が挙げられる。これは物体光の光路長をターゲットミラーの Z 軸上の移動によって変化させないためである。例えば、ミラー A とミラー B を 1 mm あたり 0.002 mm の平行度で設置した場合、物体光の光路長は、ターゲットミラーの Z 軸上の移動 1 mm で、最大 $2 \cdot 2 \cdot 2000\text{ nm} / \cos 45^\circ = 11314\text{ nm}$ 発生することになる。これを式(1-4-1)に代入し、 1°C の温度における安定性 S を求めると、 $S = 11314 \cdot 0.3 \cdot 138 / 790^2 = 0.75\text{ nm}$ となり、目標とする安定性平均値 $\pm 1\text{ nm}$ のマージンの大半を占めてしまうことが予測できる。したがってミラー A とミラー B の平行度は、 1 mm あたりサブミクロンの精度で設置する必要がある。

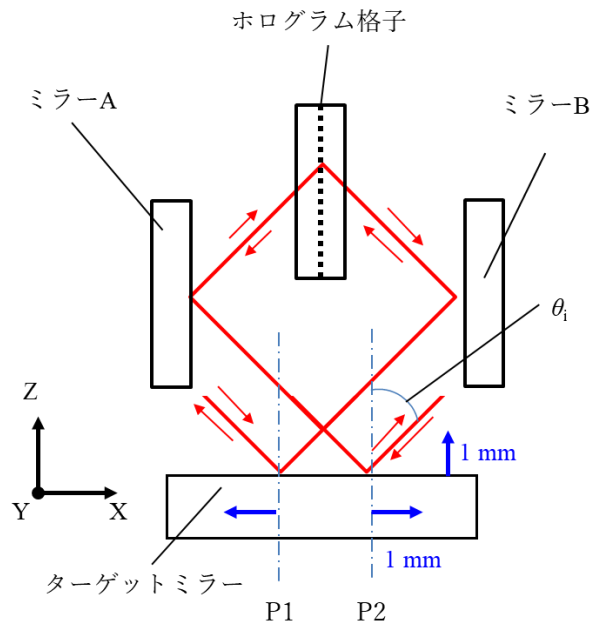


Fig. 3-3-1 Z軸上の変位検出における格子干渉計のホログラム格子部とミラー部の略図

Fig. 3-3-2 に Z 軸上の変位検出における格子干渉計の実装状態を示す。縦 46 mm×横 62 mm×厚 22 mm のサイズ内に本格子干渉計を配置することができた。ターゲットミラーと格子干渉計の筐体の距離であるワーキングディスタンスは、実使用での取り扱い性を考慮し 6.4 ~ 14.4 mm と広くとるように設計し、計測範囲は 8 mm となった。

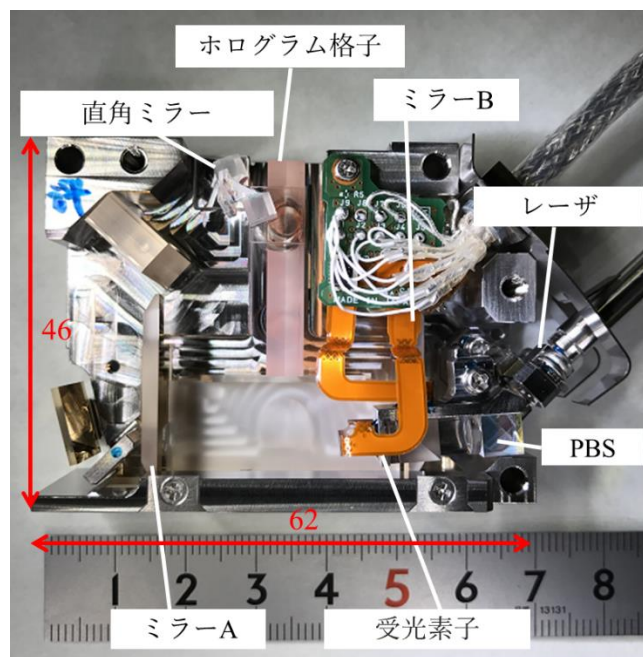


Fig. 3-3-2 Z軸上の変位検出における格子干渉計の実装

実装された格子干渉計の互いに干渉するビームの光路長差について確認をした。確認方法は、使用したマルチモードの半導体レーザの可干渉性を事前に計測し、格子干渉計の計測範囲内の出力変動から光路長差を間接的に求めた。ここでマルチモードレーザの可干渉性は、Fig. 3-3-3 に示すようにコリメートしたビームによってマイケルソンの干渉計を組み、ミラーをZ軸上に沿って ΔZ 移動させることで、物体光の光路長を変化させながら干渉強度が最大になる位置を光路長差ゼロと考え100%とし、その位置から相対的に光路長差を与えた際の干渉強度の変化率で定義する。一方、格子干渉計の干渉信号の変調率は、光路長の調整時の最大が約85%であることを確認した。これは光路長差によるものではなく、干渉する互いのビームの波面収差によって100%に到達しないことが分かっている。したがって光路長差を最小にする調整において、信号出力が最大になるところを光路長差がゼロと定義している。Fig. 3-3-4 に使用したマルチモードの半導体レーザの可干渉性を示す。また Fig. 3-3-5 にZ軸上の変位検出における格子干渉計のワーキングディスタンス内の出力の変化を示す。この出力には格子干渉計内部のホログラム格子の回折効率のばらつき等も含まれるが、最大出力の位置を100%とすると、ワーキングディスタンスが6.4 ~ 14.4 mmの間で、わずか4%しか低下しなかった。これは間接的であるが、仮にこの出力変動がすべて光路長差による変調率の変化だとすると、本格子干渉計の互いに干渉するビームの光路長差が、Z軸上の計測範囲8 mmあたり、15000 nm以内に保たれていることを示している。例えば光源の温度が1°C変化した場合、 $\lambda = 790 \text{ nm}$ 、本半導体レーザは1°Cあたりの波長変化 $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$ 、格子干渉計の信号周期が $D = 138 \text{ nm}$ であるので、式(1-4-1)に代入すると $15000 \cdot 0.3 \cdot 138 / 790^2 = 1 \text{ nm}$ となり、Z軸上の計測範囲8 mmにおいて1 nmの安定性が得られることになる。

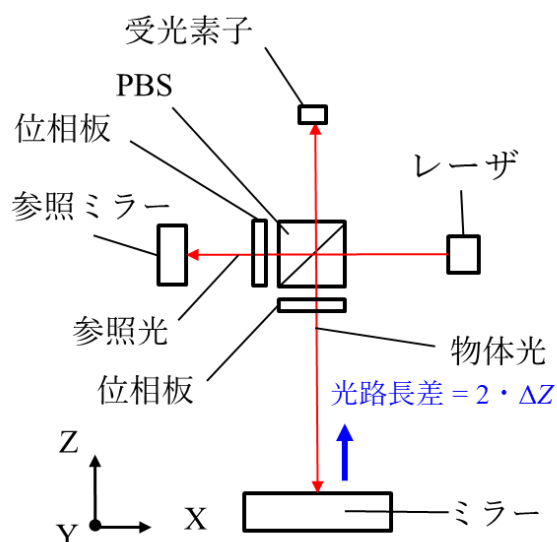


Fig. 3-3-3 半導体レーザの可干渉性の確認方法

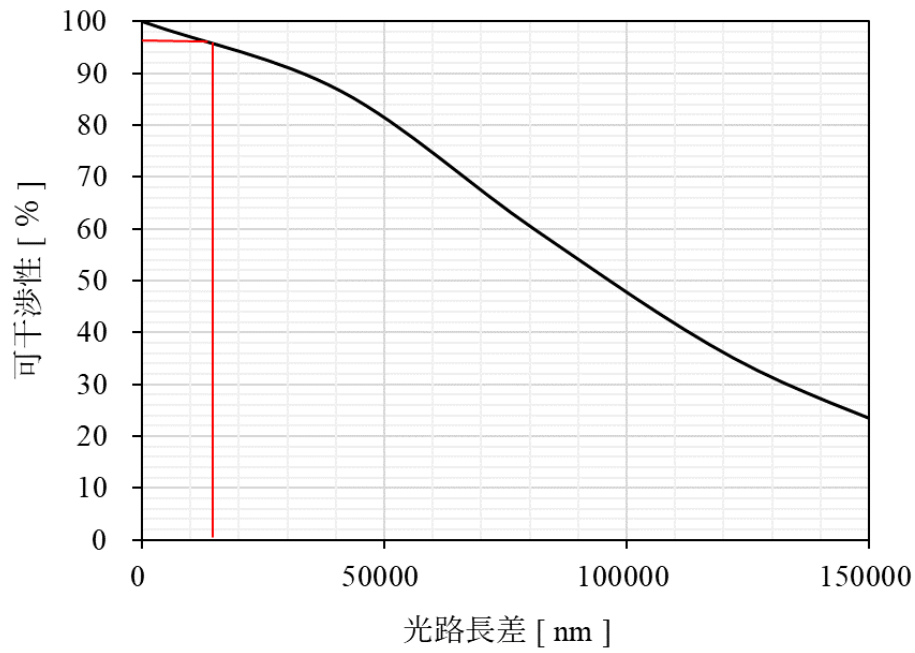


Fig. 3-3-4 使用した半導体レーザの可干渉性

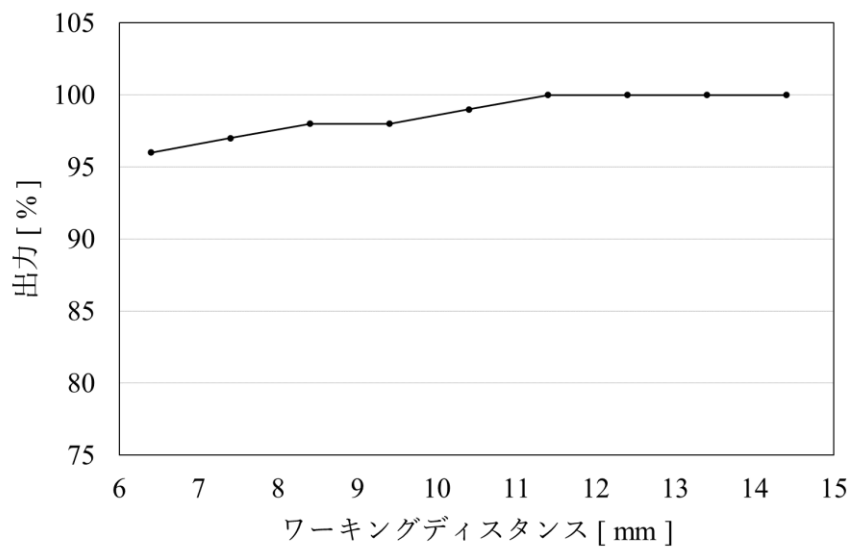


Fig. 3-3-5 Z軸上の変位検出における格子干渉計の出力特性

3-4 Z軸上の変位検出における格子干渉計の検証

3-4-1 ノイズおよび安定性の確認

ノイズおよび安定性の計測システムを Fig. 3-4-1-1 に示す。20 ± 0.05°Cにコントロールさ

れた温度コントロールボックス内で、Z軸上の変位検出における格子干渉計とターゲットミラーを固定ブロックに固定し除振台の上に置いてノイズと安定性を確認した。ノイズ計測で使用した内挿回路は16384分割で格子干渉計の信号周期が138 nmなので分解能は8.4 pmとなり、サンプリング周波数は20 kHzで取得しエイリアシングフィルタ6 kHzをかけた。一方、安定性計測で使用した内挿回路は2000分割であるため分解能は69 pmとなり、1 sごとの平均化データを取得した。

Z軸上の変位検出における格子干渉計のノイズの計測結果を Fig. 3-4-1-2 に示す。平均値 $\pm 97 \text{ pm} / 2 \text{ s}$ であった。安定性の計測結果は Fig. 3-4-1-3 に示すように平均値 $\pm 0.7 \text{ nm} / \text{h}$ であった。その間の気圧変化を Fig. 3-4-1-4 に示す。気圧変化は空気の屈折率に1 hPaあたり0.27 ppmの影響を及ぼすが、本計測時間内では2.5 hPaの変化であったため光路長差の小さい格子干渉計では無視できる。温度の変化を Fig. 3-4-1-5 に示す。温度の変化も1°Cあたり1 ppm空気の屈折率に影響を及ぼすが、半導体レーザーを用いた本格子干渉計の場合、半導体レーザーの発振波長への影響が1°Cあたり0.3 nm変化してしまうためこちらが支配的になる。温度の計測結果を式(1-4-1)に代入すると安定性は最大でも $S = 15000 \cdot 0.03 \cdot 138 / 790^2 = 0.1 \text{ nm}$ となることで計測条件としては十分な環境であることが言える。湿度の変化を Fig. 3-4-1-6 に示す。湿度の変化も空気の屈折率に10%あたり0.07 ppmであるので無視できる。

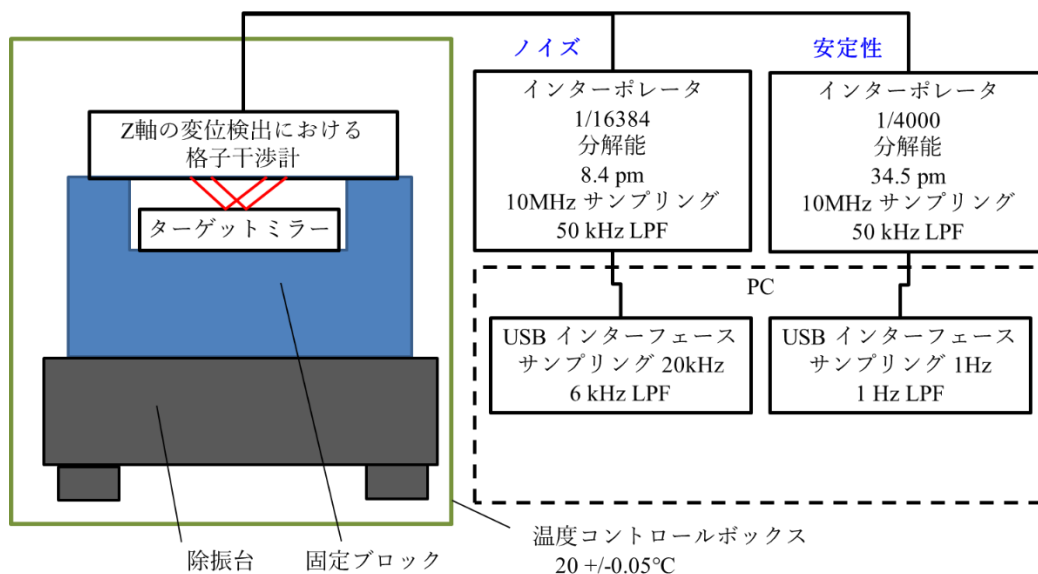


Fig. 3-4-1-1 ノイズおよび安定性の計測システム

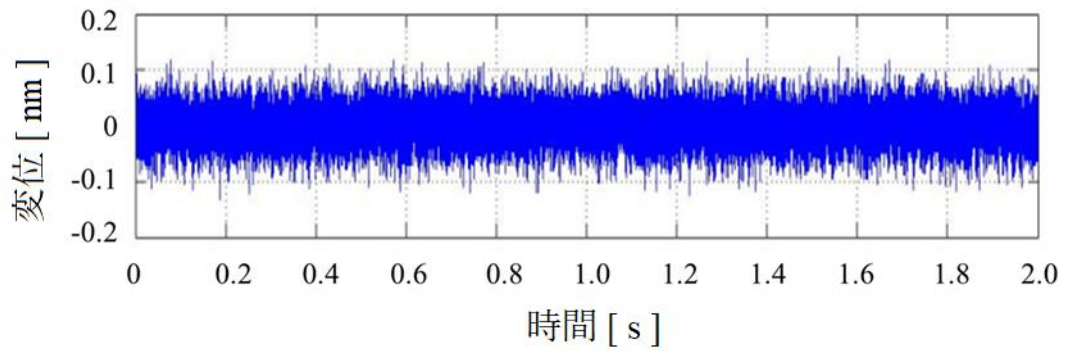


Fig. 3-4-1-2 Z軸上の変位検出における格子干渉計のノイズ計測結果

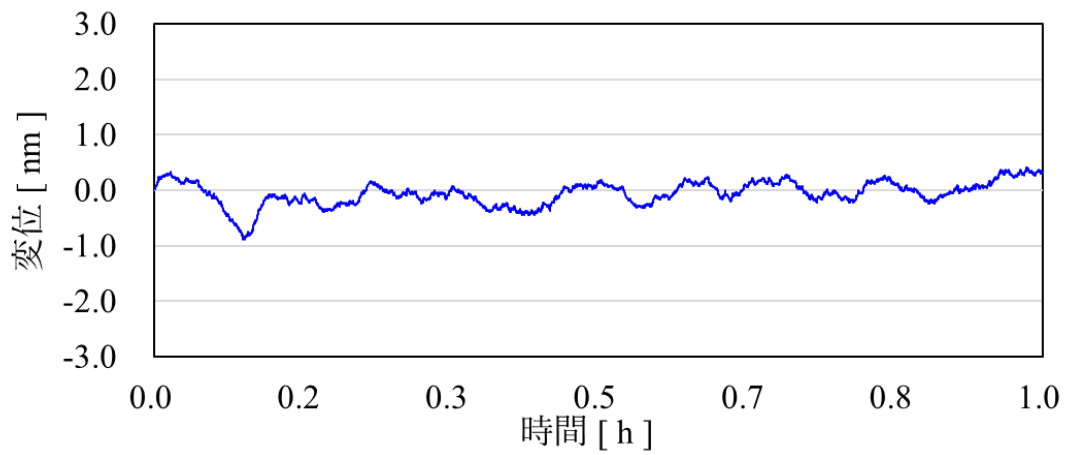


Fig. 3-4-1-3 Z軸上の変位検出における格子干渉計の安定性計測結果

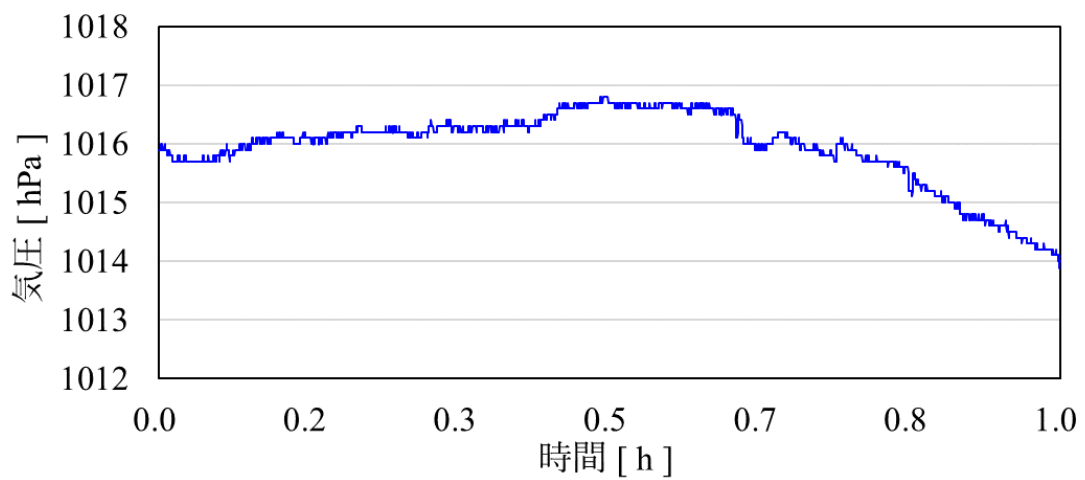


Fig. 3-4-1-4 安定性計測時の気圧

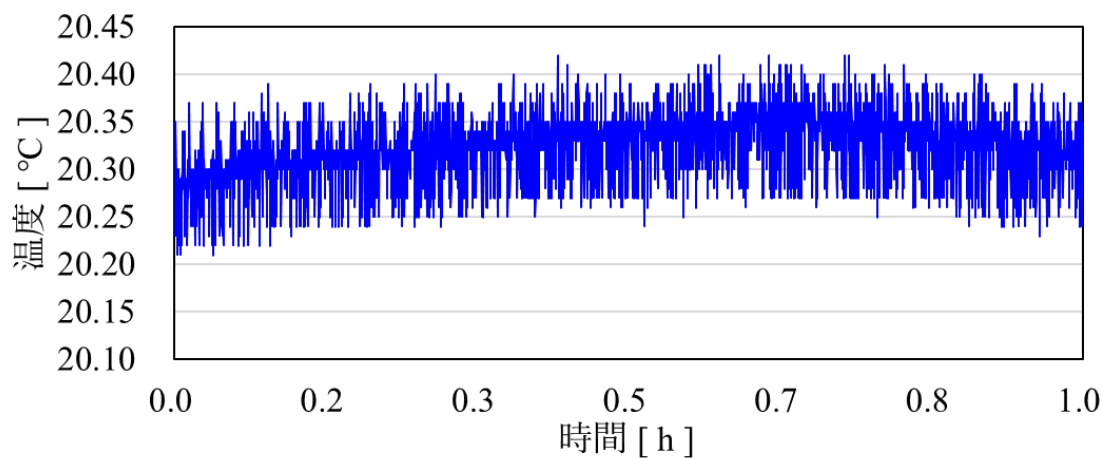


Fig. 3-4-1-5 安定性計測時の温度

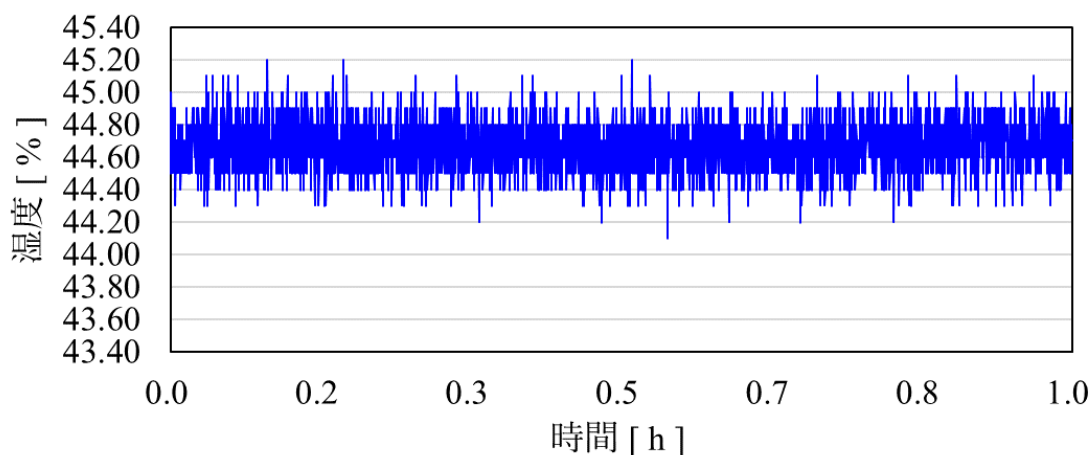


Fig. 3-4-1-6 安定性計測時の湿度

3-4-2 内挿精度の確認

内挿精度の確認に用いた装置の構成図を Fig. 3-4-2-1 に示す。ピエゾステージの上にターゲットミラーをピエゾステージの移動方向に対し垂直に設置し、本格子干渉計の検出位置の中心が光波干渉計の計測ライン上になる位置で固定し、光波干渉計と本格子干渉計の比較計測を行った。ピエゾステージは平行板バネの機構を採用しストロークは 3000 nm とした。計測のリファレンスとして He-Ne レーザを光源とした 12 倍のマルチパス干渉計は計測対象である本格子干渉計を挟み込むように配置し、マルチパス干渉計の左右ビームの光路長差が最も少ない位置で計測を行った。内挿回路であるインターポレータは 16384 内挿を使用したため、マルチパス干渉計の分解能は、信号周期 53 nm を 16384 で割ることで 3.2 pm となった。一方、Z 軸上の変位検出における格子干渉計の信号周期は 138 nm であるため、

分解能は同じく 16384 で割ることで 8.4 pm とした。その他の構成は、第 2 章の Fig. 2-4-2-2 で解説した内容と同じであるため説明を省略する。本計測には、Table 3-4-1 にまとめた 100 Hz のローパスフィルタにおける Z 軸上の変位検出における格子干渉計のノイズ、マルチパス干渉計の内挿誤差、本格子干渉計の計測ラインと光波干渉計の計測ラインのずれから生じるアッペエラーが含まれている。

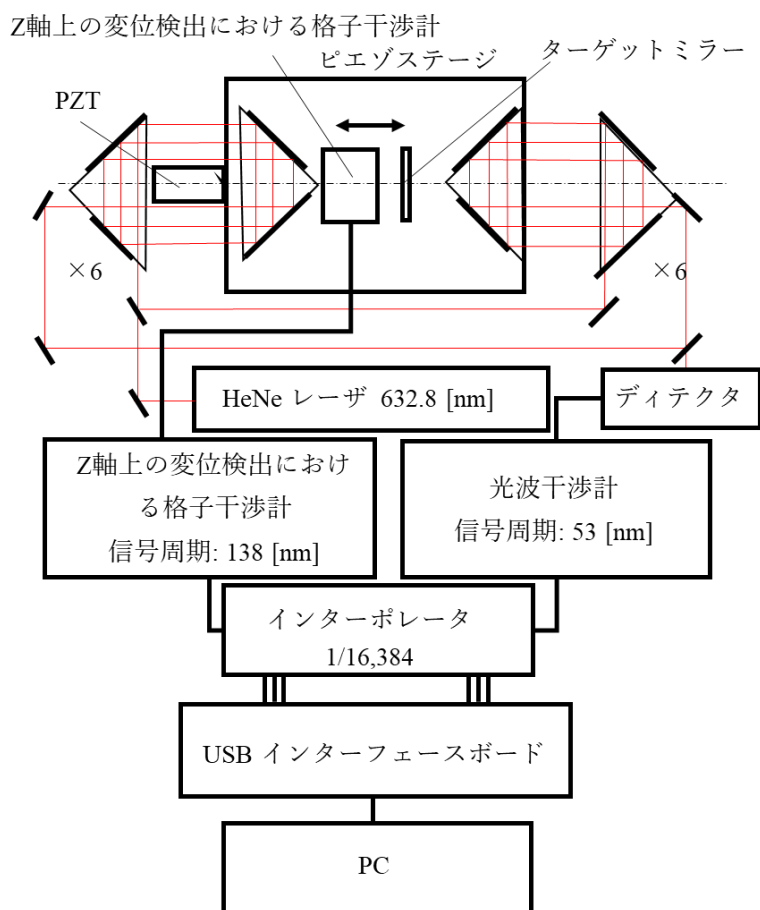


Fig. 3-4-2-1 Z 軸上の変位検出における格子干渉計の内挿精度計測装置の構成

Table 3-4-1 内挿精度の計測に含まれる誤差

項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
Z 軸上の変位検出における格子干渉計のノイズ (LPF 100 Hz)	A	正規分布	6.7 pm
光波干渉計の内挿誤差	B	一様分布	2.9 pm
計測ラインのずれによるアッペ誤差	B	一様分布	0.9 pm
合成			7.4 pm

計測結果を Fig. 3-4-2-2 に示す。Z 軸上の変位検出における格子干渉計の内挿精度は、138 nm の信号周期内で平均値 ± 38 pm であった。

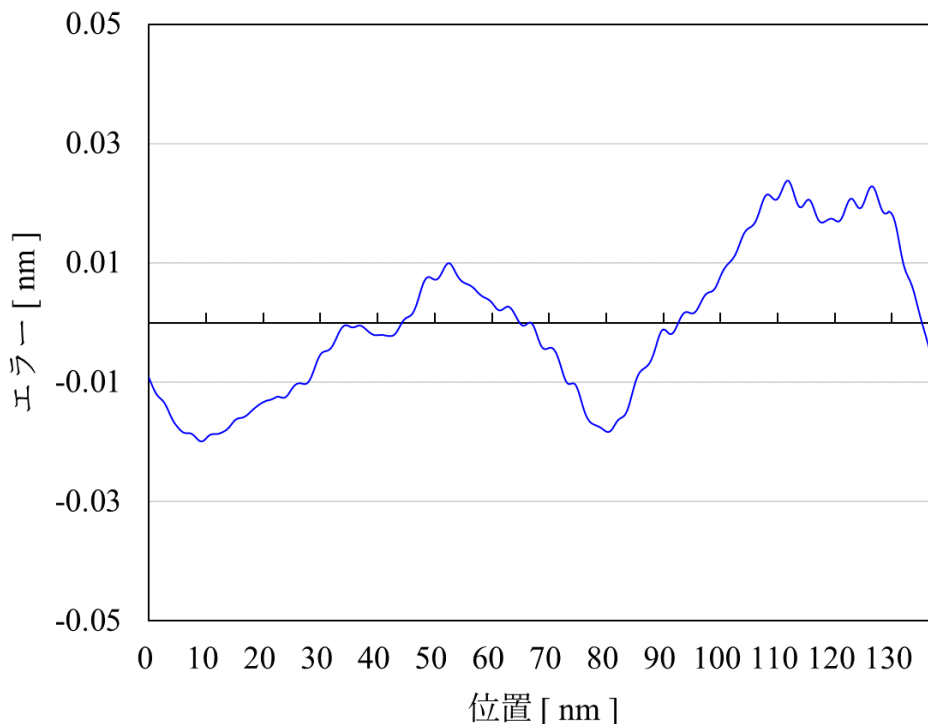


Fig. 3-4-2-2 Z 軸上の変位検出における格子干渉計の内挿精度計測結果

3-4-3 リニアリティの確認

リニアリティの確認に用いた装置の構成図を Fig. 3-4-3-1 に示し、その外観写真を Fig. 3-4-3-2 に示す。リニアモータによって制御されたエアステージの上にターゲットミラーもしくは 2 次元スケールをエアステージの移動方向に対し垂直に置き、本格子干渉計の検出位置がリファレンスとなる参照格子干渉計の計測ライン上になるように固定し、ターゲットミラーもしくは 2 次元スケールの表面の垂直方向の変位を計測する。

エアステージのストロークは 10 mm で送り速度は 1 mm/s とした。計測のリファレンスとして使用した参照格子干渉計は、1 mm あたりのリニアリティが平均値 ± 0.2 nm のスケールを使用した。また本計測には、Table 3-4-2 にまとめたように、金を蒸着したミラーの表面を計測した際の本格子干渉計のノイズ、参照格子干渉計のリニアリティ、計測ラインからのずれで生じるアッペエラーが含まれている。一方、参照格子干渉計のノイズは 6 kHz のローパスフィルタ処理後で 10 pm 以下となるため無視する。この計測に使用したインターポレータの内挿数は 2048 分割である。

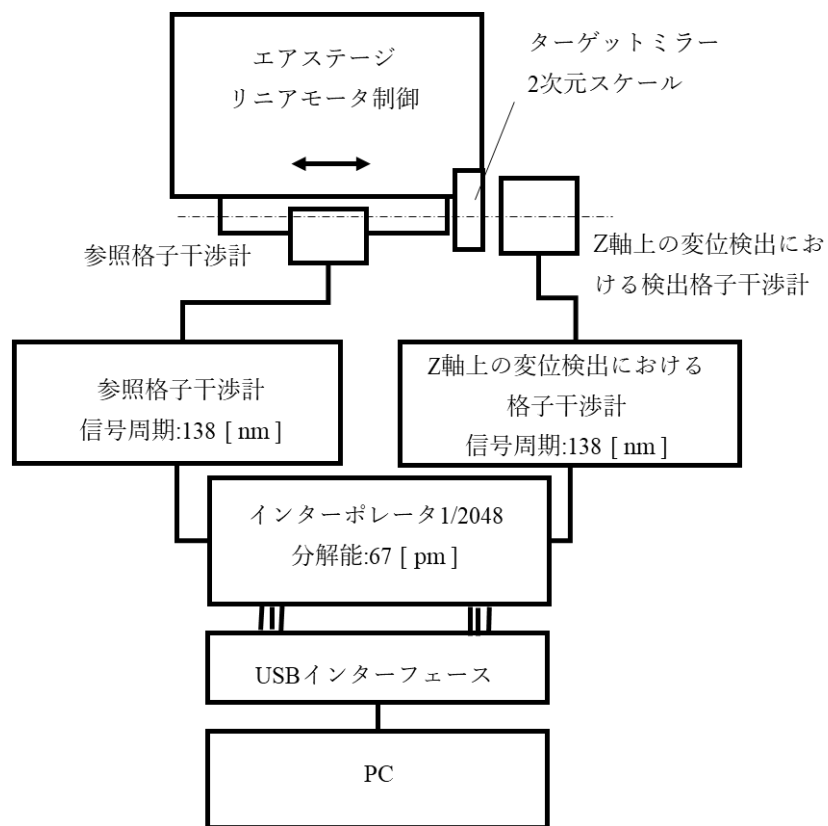


Fig. 3-4-3-1 Z 軸上の変位検出における格子干渉計のリニアリティ計測装置の構成

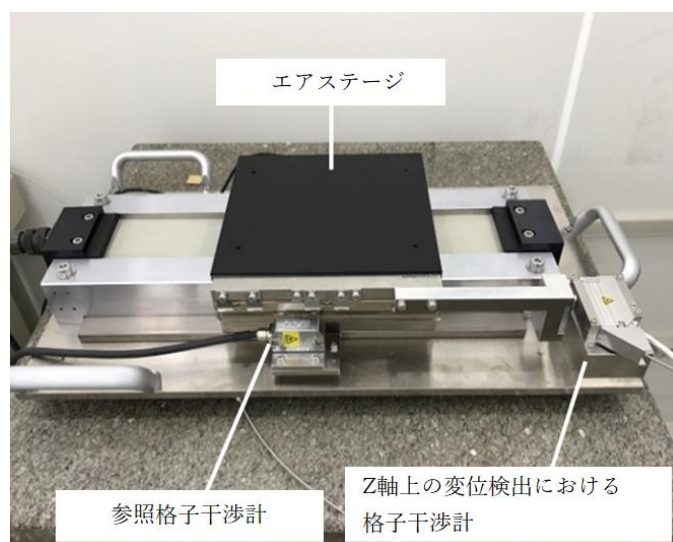


Fig. 3-4-3-2 Z 軸上の変位検出における格子干渉計のリニアリティ計測装置の外観

Table 3-4-2 リニアリティの計測に含まれる誤差

項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
Z 軸上の変位検出における格子干渉計の ノイズ (LPF 6 kHz)	A	正規分布	0.03 nm
参照格子干渉計のリニアリティ	B	一様分布	0.12 nm
計測ラインからのずれによるアッペ誤差	A	正規分布	0.17 nm
合成	0.21 nm		

リニアリティの計測結果を **Fig. 3-4-3-3** に示す。ターゲットミラーは反射率 98 %の金を蒸着したミラーを使用し、本格子干渉計に対しターゲットミラーを 8.5 mm 垂直方向に移動させた際の、本格子干渉計と参照格子干渉計の差分をプロットした。この結果から本格子干渉計のリニアリティは、平均値 \pm 4.9 nm であった。計測誤差として **Table 3-4-2** で見積もられた 0.21 nm が含まれるが、本格子干渉計の内部のホログラム格子のリニアリティが平均値 \pm 0.2 nm / mm であることから、このリニアリティが平均値 \pm 4.9 nm の要因と考えにくく、本格子干渉計の内部の光学部品の面粗度やターゲットミラーの面粗度の影響とも考えられる。そこでより細かい区間のリニアリティの再現性を確認した。メカニカルなドリフトの影響を最小限にするため、計測区間は 0.75 mm とし 8 往復させた結果をプロットした。結果を **Fig. 3-4-3-4** に示すが、本格子干渉計のリニアリティは平均値 \pm 1.2 nm となり、固有の形状が再現され、その再現性は 0.5 nm だった。本格子干渉計の再現性は非常に高いことが確認されたが、リニアリティを改善させるためには、**3-3** 節で予測したように、内部の各反射面の面粗度やターゲットミラーの面精度の改善が必要である。

Z 軸上の変位検出における格子干渉計は、XY 軸上の変位検出における格子干渉計と組み合わせ合わせて XYZ 軸上の変位検出に展開させ、3 次元エンコーダを実現する目的を持っているため、計測面が回折格子で構成された 2 次元スケールの表面も計測できる必要がある。そこで被計測物をターゲットミラーから 2 次元スケールに交換し、同様に 8 往復のリニアリティを計測した結果を **Fig. 3-4-3-5** に示す。リニアリティは平均値 \pm 1.6 nm となり、2 次元スケールの反射率は 50%に落ちるため再現性が 1 nm に悪化した。ターゲットミラーの計測結果とは異なるリニアリティの固有の形状を再現した。ここで被計測物が変わったことでリニアリティの固有の形状も変化することを確認したため、リニアリティの形状の要因の 1 つとして挙げた被計測物の面の状態が、リニアリティとして検出されたことが言える。

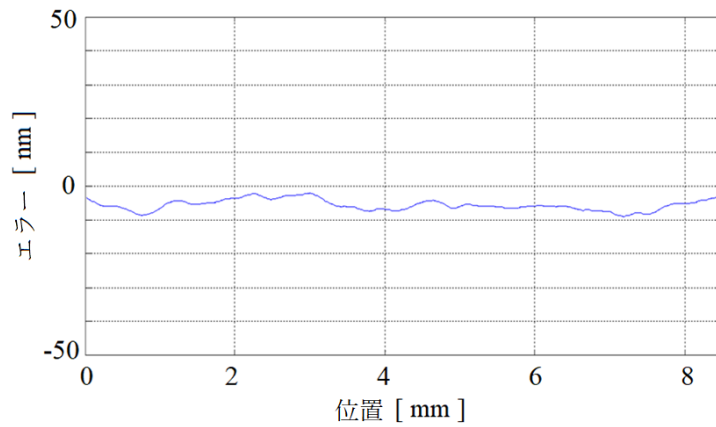


Fig. 3-4-3-3 リニアリティ計測結果

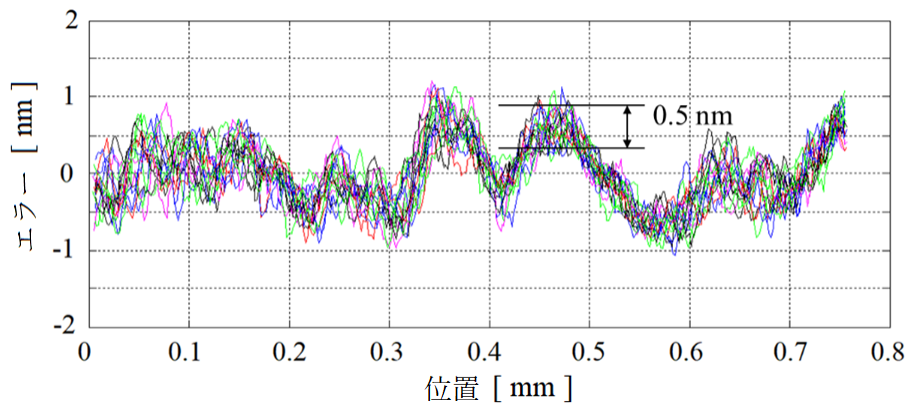


Fig. 3-4-3-4 リニアリティの再現性

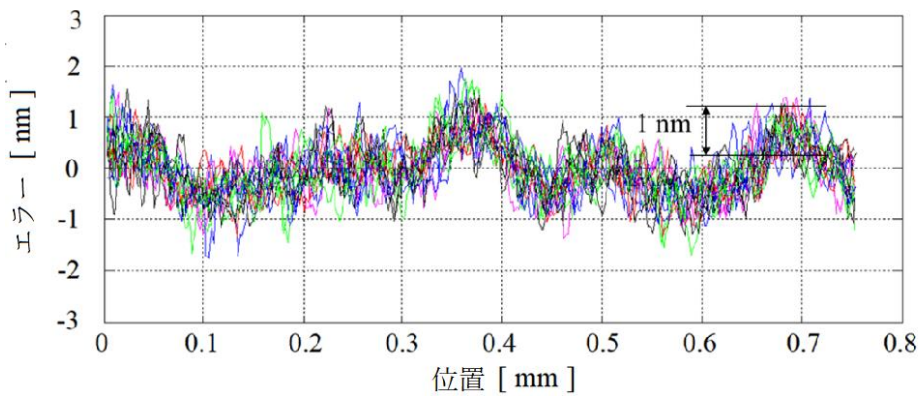


Fig. 3-4-3-5 2次元スケールの表面をターゲットにしたリニアリティ再現性

3-4-4 被計測物の回転による計測誤差の確認

Z 軸上の変位検出における格子干渉計は、被計測物の変位に対し Z 軸上の変位のみを正確に検出する必要がある。XY 軸上の変位検出における格子干渉計と組み合わせる場合、2次元スケールの高さ方向の変位検出をすることになるが、2次元スケールが装着される半導

体の製造装置では、ウェハの平面に合わせてステージ自体の姿勢を変化させるため、使用用途によっては、300 mm あたり 0.03 mm の傾きである 0.1 mrad を許容しなければならない。さらに Z 軸上の変位検出における格子干渉計は、被計測物の回転に対し 0 ± 0.1 mrad の角度許容を持つだけでなく、この回転による Z 軸上の変位検出に加わる誤差も小さいことが理想である。

Fig. 3-4-4-1 に Z 軸上の変位検出における格子干渉計の角度許容と、Z 軸上の変位検出に加わる誤差の検証方法を示す。本格子干渉計に対しターゲットミラーをゴニオステージで Y 軸方向と X 軸方向に回転させ本格子干渉計の出力変化と変位を計測した。

Fig. 3-4-4-2 に角度許容の確認結果を示し、出力は Y 軸回りの回転と X 軸回りの回転にターゲットミラーを 0 ± 4 mrad 回転させ 80 % 以上を確保していた。使用した内挿回路であるインターポレータの性能を維持するための出力許容は 50 ~ 120 % を想定しているため、実使用で要求される 0 ± 0.1 mrad に対し、十分な許容を持っていることが確認された。

次に Y 軸回りに回転させたときの本格子干渉計の変位を計測した結果を **Fig. 3-4-4-3** に、X 軸回りに回転させたときの本格子干渉計の変位を計測した結果を **Fig. 3-4-4-4** に示す。ただしこの計測では、ゴニオステージの回転中心の設定位置によって Z 軸上の変位が変化してしまうため、回転による誤差の直線性がどれだけあるかを幾何光学的なシミュレーション結果と共に比較した。幾何光学的なシミュレーションには、三次元 CAD ソフトの CATIA を用いた。結果は、Y 軸回りと X 軸回りに 0 ± 0.2 mrad 回転させた結果 0 ± 5 nm 以下の誤差に入っており、シミュレーション結果ともほぼ一致することが確認された。

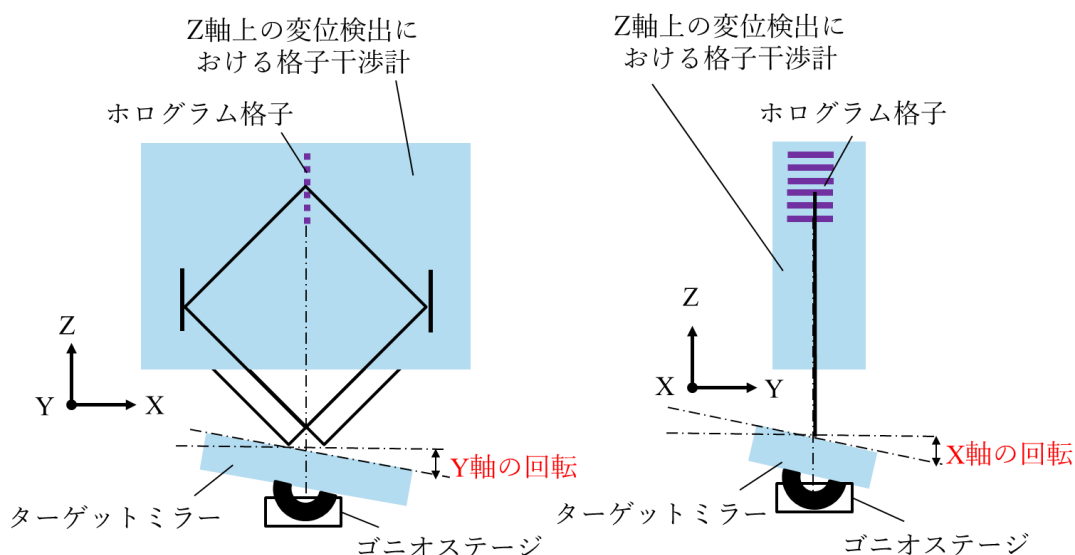


Fig. 3-4-4-1 Z 軸上の変位検出における格子干渉計の角度許容と角度依存誤差の検証方法

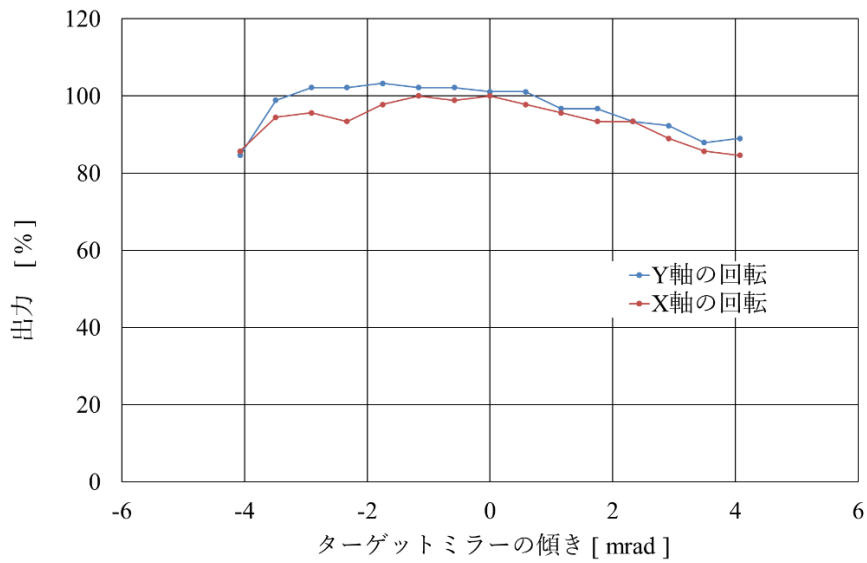


Fig. 3-4-4-2 Z軸上の変位検出における格子干渉計の角度許容確認結果

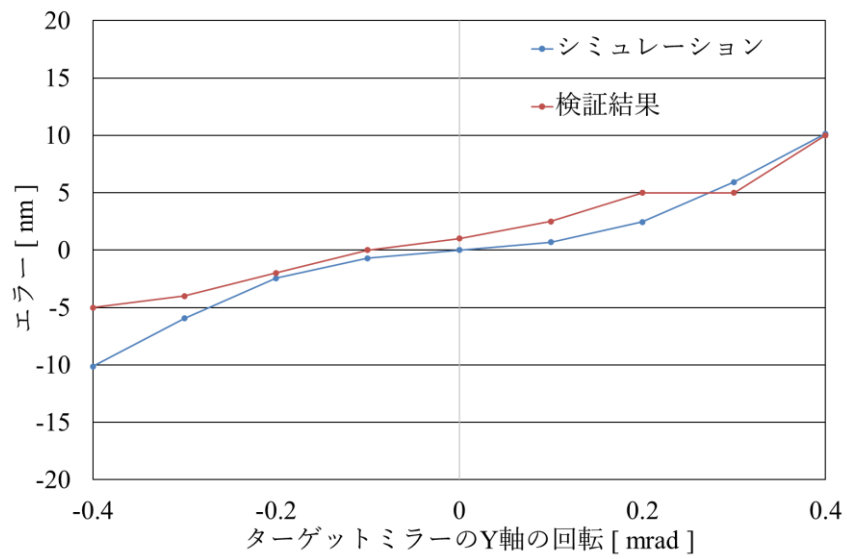


Fig. 3-4-4-3 ターゲットミラーをY軸回りに回転させたときの誤差

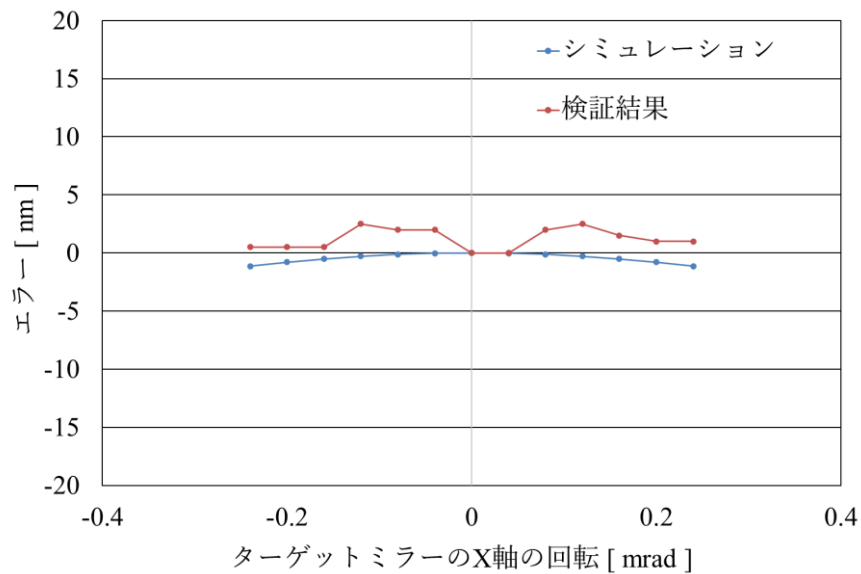


Fig. 3-4-4-4 ターゲットを X 軸回りに回転させたときの誤差

特にターゲットミラーの Y 軸回りの回転による誤差は、本格子干渉計の物体光の光路長の変化が幾何光学的に発生することが分かっているため、この Y 軸回りの回転にのみ、光学的に誤差を抑制する方法も提案されている^[55]。

次にターゲットミラーを Y 軸回りと X 軸回りに回転させた状態で Fig. 3-4-3-1 に示したリニアリティ計測装置を用いてリニアリティを確認した。検証方法を Fig. 3-4-4-5 に示す。ターゲットミラーの Y 軸回りと X 軸回りの回転量は、それぞれ 0 ± 0.29 mrad とし、ターゲットミラーを Z 軸上で 1 mm 移動させてリニアリティを確認した。

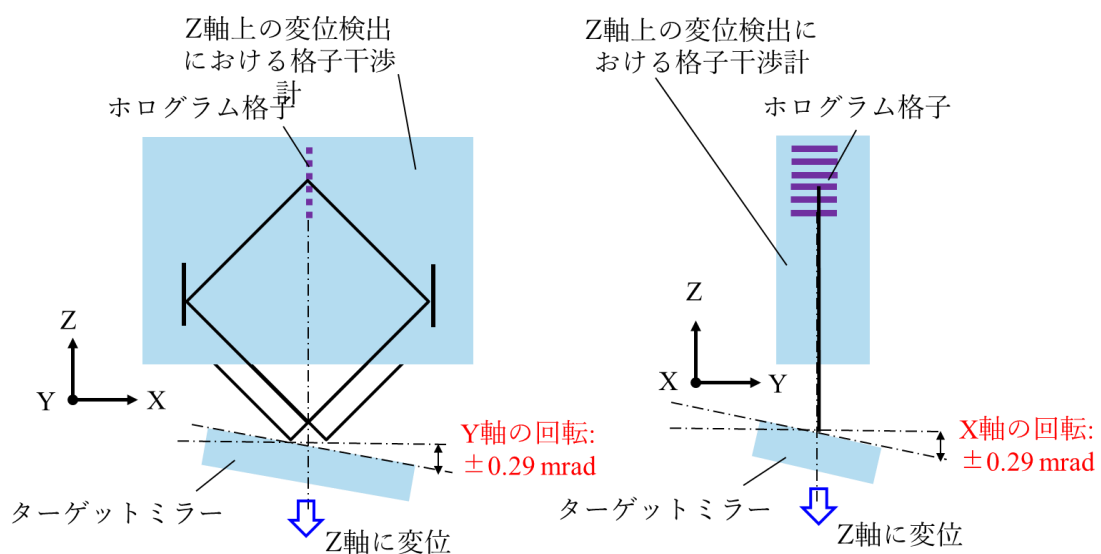


Fig. 3-4-4-5 ターゲットミラーを回転させた状態でのリニアリティの検証方法

Fig. 3-4-4-6 にターゲットミラーを Y 軸回りに回転させた状態のリニアリティ計測結果を示す。回転をさせない 0 mrad と 0 ± 0.29 mrad 回転させた状態のリニアリティ計測結果を重ねたが、計測範囲 1 mm において平均値 ± 5 nm 以内の誤差に入っていた。次に Fig. 3-4-4-7 にターゲットミラーを X 回りに回転させた状態のリニアリティ計測結果を示す。同様に回転をさせない 0 mrad と 0 ± 0.29 mrad 回転させた状態のリニアリティ計測結果を重ねたが、計測範囲 1 mm において平均値 ± 3 nm 以内の誤差に入っていた。

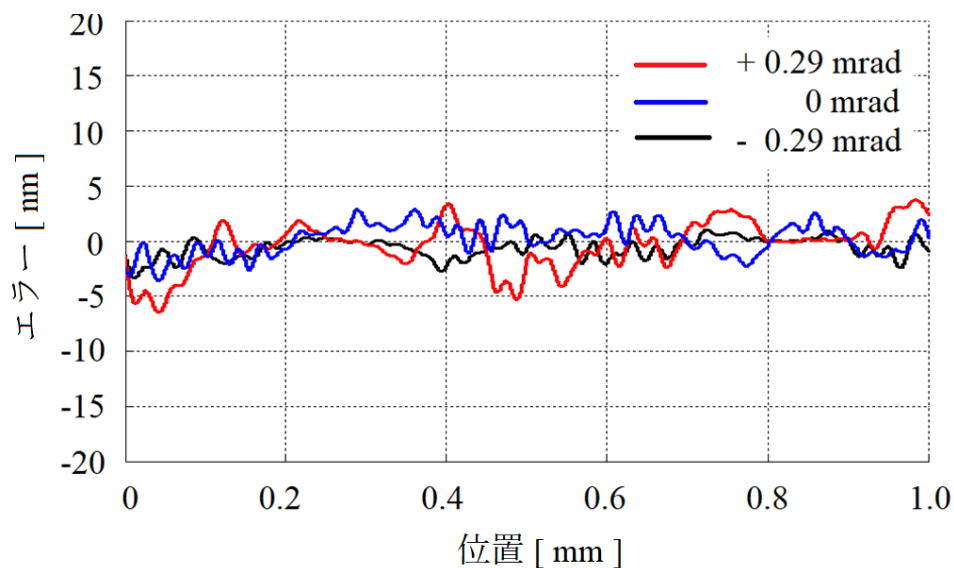


Fig. 3-4-4-6 ターゲットミラーを Y 回りに回転させた状態のリニアリティ計測結果

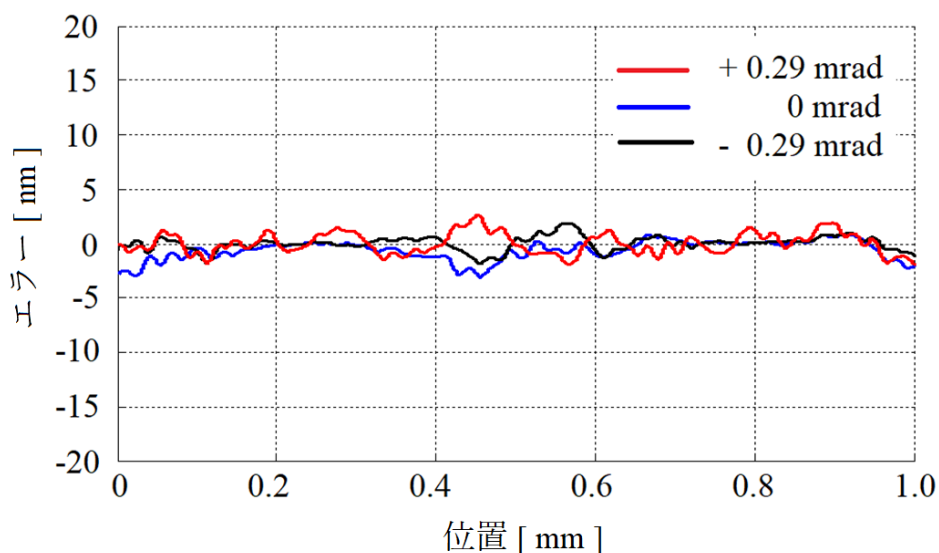


Fig. 3-4-4-7 ターゲットミラーを X 回りに回転させた状態のリニアリティ計測結果

3-5 結言

本章では、新規に Z 軸上の変位検出における格子干渉計の原理を提案し、0.2 nm 以下の検出分解能を達成させ、1 mm の検出範囲と 3 mm 以上のワーキングディスタンスを有し、最終的に 2 次元スケール表面の Z 軸上の変位検出をすることを確認することを目的として、その基本性能を確認した。実装した本格干渉計の検証結果を **Table 3-5-1** に示す。信号周期は、設計どおり 138 nm を得ており 16384 分割の内挿回路と組み合わせ分解能 8.4 pm を達成させた。ノイズは 6 kHz のローパスフィルタで処理した後で 0 ± 97 pm、安定性は 1 h あたり平均値 ± 0.7 nm を得ており、格子干渉計の特徴である計測環境変化に依存しない高い計測安定性計を確認した。内挿精度は 0 ± 38 pm、リニアリティは平均値 ± 1.2 nm / 0.75 mm、ターゲットミラーの回転によるリニアリティの確認結果は、ターゲットミラーを Y 軸回りに 0 ± 0.29 mrad 回転させた状態において平均値 ± 5 nm、X 軸回りに 0 ± 0.29 mrad 回転させた状態において平均値 ± 3 nm のリニアリティを実現していた。一方、Z 軸回りの回転に関しては、反射光を検出する本原理では、誤差が発生しない。したがって XY 軸上の変位検出における格子干渉計と組み合わせることで、ナノメートルオーダーの XYZ 軸上の変位検出を可能にする 3 次元エンコーダの実現に繋げる目処が立てられたため、本章の目的は達成できたと判断する。

Table 3-5-1 Z 軸上の変位検出における格子干渉計の検証結果

評価項目	計測結果
信号周期	138 nm
分解能(16384 内挿)	8.4 pm
ノイズ	0 ± 97 pm / 6 kHz LPF
安定性	平均値 ± 0.7 nm / 1 h
内挿精度	0 ± 38 pm / 138 nm
リニアリティ(ミラー面)	平均値 ± 4.9 nm / 8.5 mm
	平均値 ± 1.2 nm / 0.75 mm
リニアリティ(2次元スケールの面)	平均値 ± 1.6 nm / 0.75 mm
リニアリティの再現性(2次元スケールの面)	1 nm
角度許容	0 ± 4 mrad
ターゲットミラーの Y 軸回りの回転 におけるリニアリティ	平均値 ± 5 nm / 0.29 mrad
ターゲットミラーの X 軸回りの回転 におけるリニアリティ	平均値 ± 3 nm / 0.29 mrad
ターゲットミラーの Z 軸回りの回転 におけるリニアリティ	反射光を検出するため原理的に誤差 が無い

第4章 XZ軸上の変位検出における格子干渉計の開発

4-1 緒言

本研究の目的である3次元エンコーダの実現は、第2章のXY軸上の変位検出における格子干渉計と第3章のZ軸上の変位検出における格子干渉計を隣接配置することで実現できるが、それぞれの格子干渉計の原理が異なるため一体化することが困難で、2次元スケール上で、XY軸上の変位検出における格子干渉計とZ軸上の変位検出における格子干渉計の変位検出位置を一致させることが難しい。この変位検出位置が一致しないことは、ステージの制御においてアッペエラーの補正を複雑にさせることになる。したがって2次元スケール上で、XYZ軸上の変位検出位置を一致させる格子干渉計の実現は、将来の高精度なステージ制御にメリットがあると考えられる。

本章では、Z軸上の変位検出における検出光路内の互いに干渉し合うビームの光路長差が発生しない格子干渉計の提案をXZ軸上の変位検出にも適用させた、XZ軸上の変位検出における格子干渉計の原理^[56]を新たに提案する。また、実装によって、X軸上の変位検出における分解能が0.04 nm以下、Z軸上の変位検出における分解能が0.2 nm以下、1 mmのZ軸上の変位検出範囲、安定性、リニアリティといった基本性能を確認することで、3次元エンコーダの実現に繋げることを目的とする。

4-2 XZ軸上の変位検出における格子干渉計の提案

Fig. 4-2-1に、XZ軸上の変位検出における格子干渉計方式の検出原理を示す。光源であるレーザにはマルチモードの半導体レーザを使用しており、そのビームは偏光ビームスプリッタ(PBS)によって、参照光Rと参照光Lとして、スケールに入射する物体光として分離される。物体光は、スケールによって±1次の回折をして、物体光Rと物体光Lとなる。2つの物体光は、それぞれ2つのホログラム格子ORとホログラム格子OLによって回折され、ミラーによって同じ光路に戻されるが、光源側にビームを戻さないように、復路のビームは、往路の入射位置と重ならないようにスケール面のX軸上にずらして入射される。このホログラム格子ORとホログラム格子OLは、透過型のボリュームタイプホログラム格子を使用しており、ブラッグ条件を満たす角度で入射することで非常に高い回折効率で回折させることができる。復路の物体光Rと物体光Lは、それぞれスケールで2回の回折がなされ、ホログラム格子ORとホログラム格子OLによっても2回の回折がされていることになる。一方、参照光である参照光Rと参照光Lは、参照スケールによって回折され、ホログラム格子RRとホログラム格子RLでも回折され、ミラーによって同じ光路に戻されるが、これも光源側にビームを戻さないように、復路のビームは、往路の入射位置と重ならないようにスケール面のX軸上にずらして入射される。復路の参照光Rと参照光Lは、それぞれ参照

スケール R と参照スケール L で 2 回の回折がなされ、ホログラム格子 RR とホログラム格子 L によっても 2 回の回折がされていることになる。この復路のビームのうち物体光 R は、PBS によって参照光 R と重ね合わされ、右側の受光部に向かい、物体光 L も PBS によって参照光 L と重ね合わされ、左側の受光部に向かう。この両側の受光部は、それぞれ $\lambda/4$ 位相板と無偏光ビームスプリッタである BS と 2 つの PBS と 4 つの受光素子で構成される。右側の重ね合わされた物体光 R と参照光 R、左側の重ね合わされた物体光 L と参照光 L は、互いに偏光軸が直交する P 偏光成分と S 偏光成分であるため、そのままでは干渉はしない。そこで $\lambda/4$ 位相板によって右回りと左回りの円偏光成分の重ね合わされたビームとなり、BS によって 2 分割される。ここで右側の受光部に着目すると、BS によって 2 分割されたビームの一方は、PBS により特定の角度の偏光成分同士の干渉光が取り出され、受光素子 $R0^\circ$ と受光素子 $R180^\circ$ によって受光される。もう一方のビームは、PBS により特定の角度の偏光成分同士の干渉光が取り出され、受光素子 $R90^\circ$ と受光素子 $R270^\circ$ によって受光される。左側の受光部に着目すると、BS によって 2 分割されたビームの一方は、PBS により特定の角度の偏光成分同士の干渉光が取り出され、受光素子 $L0^\circ$ と受光素子 $L180^\circ$ によって受光される。もう一方のビームは、PBS により特定の角度の偏光成分同士の干渉光が取り出され、受光素子 $L90^\circ$ と受光素子 $L270^\circ$ によって受光される。

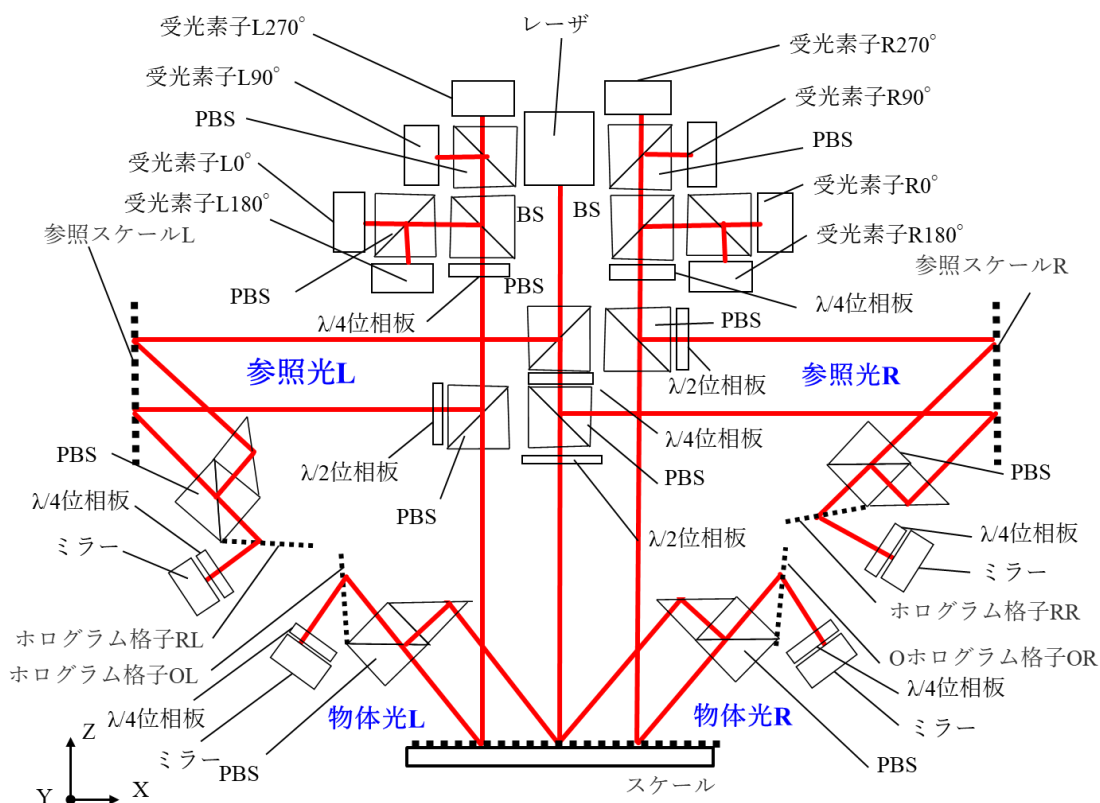


Fig. 4-2-1 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計方式の検出原理図

この格子干渉計の原理のとしての特徴は、スケールが、Z 軸上に移動しても、物体光である物体光 R と物体光 L の光路長が変化しないことにある。Fig. 4-2-2 にスケールが Z 軸上に移動した際の物体光の動きと、その光路長について示す。スケールが ΔZ だけ Z 軸上に移動すると、光路長は、式(4-2-1)の関係が成り立ち光路長 $M1+M2$ によって相殺されるため変化しない。

$$\Delta Z = M1 + M2 \quad (4-2-1)$$

この条件は、角度 θ および角度 α が、式(4-2-2)で成立する。

$$-\cos(\alpha + \theta) / \cos \alpha + \{ \sin(\alpha + \theta) - \cos(\alpha + \theta) \tan \alpha \} \sin \alpha = 1 \quad (4-2-2)$$

本条件は、光源の波長を 790 nm、スケールの 1 格子ピッチを 1000 nm、ホログラム格子の 1 格子ピッチを 552 nm とすると $\theta = 52.2^\circ$ 、 $\alpha = 45^\circ$ で成立する。つまり本格子干渉計はスケールが X 軸上の移動によって光路長が変化しないことはもちろんのこと、Z 軸上の移動によってもホログラム格子上のビームの位置が移動するだけで、光路長の変化はない。したがって物体光の光路長は、スケールの移動に関係なく一定であり、光路の折り返し部であるミラーによって、参照光との光路長と物体光の光路長を調整する際に、可干渉性の低いマルチモードの半導体レーザを使用することで、干渉信号出力を見ながら、数マイクロメートルレベルで等しくなるように調整することができる。したがって使用環境の温度変化による光源の波長変化や、気圧や湿度の変化による空気の屈折率の変化の影響はキャンセルされ、長時間の安定した計測を可能にする。

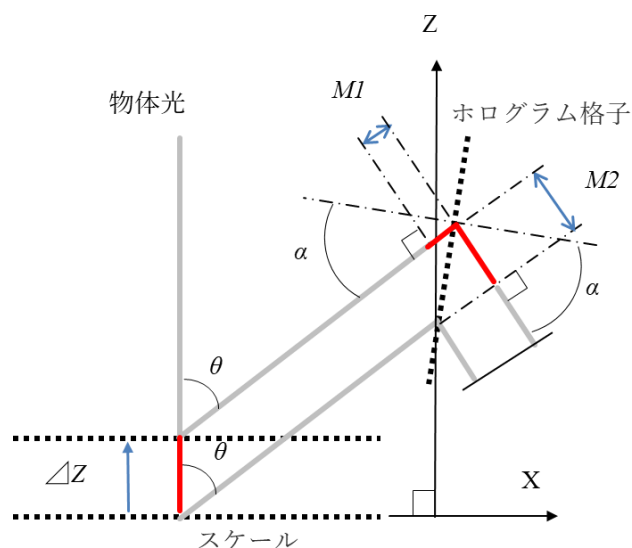


Fig. 4-2-2 スケールが Z 軸上を移動した際の光路と光路長の関係

各受光素子が受光する干渉光のうち物体光 R と物体光 L は、スケールの X 軸上の回折格子によって往復で 2 回の回折がされているため、往復で $2K_1x$ の正負の位相が乗じられている。さらにホログラム格子 OR とホログラム格子 OL の Z 軸方向の回折格子によって往復で

2回の回折がされているため、ホログラム格子ORでは往復で $2\mathbf{K}_2z$ 、ホログラム格子OLでは往復で $2\mathbf{K}_3z$ の位相も乗じられる。一方、参照光Rと参照光Lは、参照スケールRと参照スケールLが固定されているためビームの動きはなく、原理説明での位相変化はゼロとする。あえて物体光Rと物体光Lと同じ参照スケールR、参照スケールL、ホログラム格子RRやホログラム格子RLを配置した理由は、温度変化等で光源の波長が変化した際に生じる、各回折格子での回折角の変化による光路長や光路の変化を物体光の光路に対し対称配置にすることにより、キャンセルするためである。ここで \mathbf{K}_1 はスケールの波数ベクトル $\mathbf{K}_1 = 2\pi / d_1$ で d_1 はスケールの1格子ピッチ、 \mathbf{x} はスケールの検出方向の位置ベクトルを意味し、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_3 はホログラム格子Rとホログラム格子Lの波数ベクトル $2\pi / t d_2$ であり d_2 はホログラム格子の1格子ピッチ、同じホログラム格子を使うため $|\mathbf{K}_2| = |\mathbf{K}_3|$ になる。 z はホログラム格子Rとホログラム格子LのZ軸上の位置ベクトルで、 t は互いにZ軸を対象に傾かせたホログラム格子Rとホログラム格子Lの1格子ピッチに与える係数である。干渉光は、スケールが1格子ピッチ分だけX軸上に移動することで2回明暗を繰り返すことになり、スケールがホログラム格子Rとホログラム格子Lの1格子ピッチ分だけZ軸上に移動すると、この干渉光は2回明暗を繰り返すことになる。つまりこの左右の干渉光は、スケールとホログラム格子Rとホログラム格子LからX軸方向とZ軸方向の位相成分が乗じられていることになる。

ここで右側の参照光Rと物体光Rのビームの時間変動成分を除いた複素振幅 E は次式で示せる。

$$E = \exp \{ i (\mathbf{k} \mathbf{r}) \} \quad (4-2-3)$$

\mathbf{k} はビームの波数ベクトル、 \mathbf{r} は光路上の位置ベクトル、 i は虚数単位である。したがって参照光Rの複素振幅 E_r は次式で示せる。ここで参照光Rに参照スケールRやホログラム格子からの位相変化を乗じていないのは、参照スケールRが固定されて動かないためホログラム格子上のビームの移動も無いからである。

$$E_{rr} = \exp \{ i (\mathbf{k} \mathbf{r} + \Phi_1) \} \quad (4-2-4)$$

また右側の物体光ORの複素振幅 E_{or} は次式となる。

$$E_{or} = \exp \{ i (\mathbf{k} \mathbf{r} + 2\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + 2\mathbf{K}_2 z + \Phi_2) \} \quad (4-2-5)$$

したがって干渉光の強度 I_R は、次式で表すことができる。 Φ_1 と Φ_2 は初期位相であり、回折格子の移動による位相に関係が無いいため $\Phi_R = \Phi_1 - \Phi_2$ とする。

$$\begin{aligned} I_R &= (E_{or} + E_{rr}) (E_{or} + E_{rr})^* \\ &= 2 + 2 \cos (2\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + 2\mathbf{K}_2 z - \Phi_R) \end{aligned} \quad (4-2-6)$$

次に参照光Lの複素振幅 E_l は次式で示せる。ここで参照光に参照スケールLやホログラム

格子 RL からの位相変化を乗じていないのは、参照スケール L が固定されて動かないため、ホログラム格子 RL 上のビームの移動も無いからである。

$$\mathbf{E}_{rl} = \exp \{ i (\mathbf{k} \mathbf{r} + \Phi_3) \} \quad (4-2-7)$$

また左側の物体光の物体光 L の複素振幅 \mathbf{E}_{ol} は、スケールでの回折方向が \mathbf{E}_{or} に対して反対になるので符号がマイナスになり、次式となる。

$$\mathbf{E}_{ol} = \exp \{ i (\mathbf{k} \mathbf{r} - 2\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + 2\mathbf{K}_3 \mathbf{z} + \Phi_4) \} \quad (4-2-8)$$

ここでも \mathbf{z} はホログラム格子 OL の Z 軸検出の位置ベクトルとしているので、 t はホログラム格子 OL の傾きによる 1 格子ピッチ与える係数であり、Z 軸を中心にホログラム格子 R と対象に傾いており、1 格子ピッチも同じであるため同じ値となる。したがって干渉光の強度 I_L は、次式で表すことができる。 Φ_3 と Φ_4 は初期位相であり、回折格子の移動による位相に関係が無いので $\Phi_L = \Phi_3 - \Phi_4$ とする。

$$\begin{aligned} I_L &= (\mathbf{E}_{ol} + \mathbf{E}_{rl}) (\mathbf{E}_{ol} + \mathbf{E}_{rl})^* \\ &= 2 + 2 \cos (- 2\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + 2\mathbf{K}_3 \mathbf{z} - \Phi_L) \end{aligned} \quad (4-2-9)$$

今回スケールの 1 格子ピッチを 1000 nm、ホログラム格子の 1 格子ピッチを 552 nm、 $\theta = 52.2^\circ$ 、 $\alpha = 45^\circ$ としたため、 $\theta - (90^\circ - \alpha) = 7.2^\circ$ で、 $t = 1.12$ を適用すると、スケールが X 軸上を動くと、信号周期 500 nm の干渉信号が得られ、Z 軸方向に動くと信号周期 246 nm の干渉信号が得られる。

Fig. 4-2-3 に XZ 軸上の変位検出における信号処理の方法、**Fig. 4-2-4** に内挿回路であるインターポレータの信号処理方法を示す。干渉信号 I_L と I_R にはそれぞれ X 軸方向と Z 軸方向の変位情報が含まれるため、分離する必要がある。

まず干渉信号 I_R は、受光素子 R0°, 受光素子 R180°, 受光素子 R90°, 受光素子 R270° で構成されるが、インターポレータ内部の差動アンプで sin 信号と cos 信号を生成し、アナログデジタル変換器である AD コンバータによってデジタル信号に変換される。内挿数は 16384 分割とし、X 軸上の変位検出で 30.5 pm の分解能、Z 軸上の変位検出で 15 pm の分解能が得られ、+X 軸上と+Z 軸上の変位情報として USB インターフェースを用いて PC に出力する。次に干渉信号 I_L は、受光素子 L0°, 受光素子 L180°, 受光素子 L90°, 受光素子 L270° で構成され、同様にインターポレータ内部の差動アンプで sin 信号と cos 信号を生成し、AD コンバータによってデジタル信号に変換される。内挿数は 16384 分割とし、X 軸上の変位検出で 30.5 pm の分解能、Z 軸上の変位検出で 15 pm の分解能が得られ、-X 軸上と+Z 軸上の変位情報として USB インターフェースを用いて PC に出力する。PC ではサンプリング周波数 20 kHz で変位情報を受け取り、エリアシングフィルタ 6 kHz をかけた後、インターポレータ R とインターポレータ L の変位情報の加算減算を行う。インターポレータ R には+X 軸上と+Z 軸上の変位情報、インターポレータ L には-X 軸上と +Z 軸上の変位情報が含ま

れるため、 $(R-L)/2$ を X 軸上の変位情報とし、 $(R+L)/2$ を Z 軸上の変位情報として分離することができる。したがって X 軸上で 30.5 pm, Z 軸上においても 15 pm という高い分解能を持つ XZ 軸上の変位検出における格子干渉計を実現できる。またこの格子干渉計を Z 軸回りに 90°回転させれば、YZ 軸上の変位検出における格子干渉計となり、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計と YZ 軸上の変位検出における格子干渉計、そして 2 次元スケールを組み合わせることで、XYZ 軸上の変位検出における格子干渉計を構成することができる。

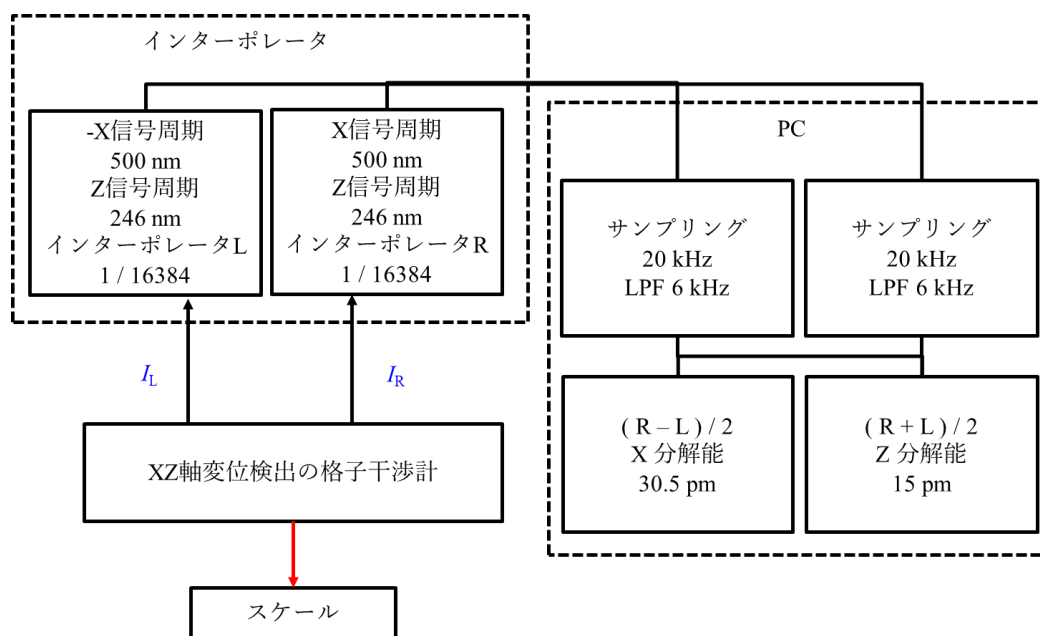


Fig. 4-2-3 XZ 軸上の変位検出における信号処理

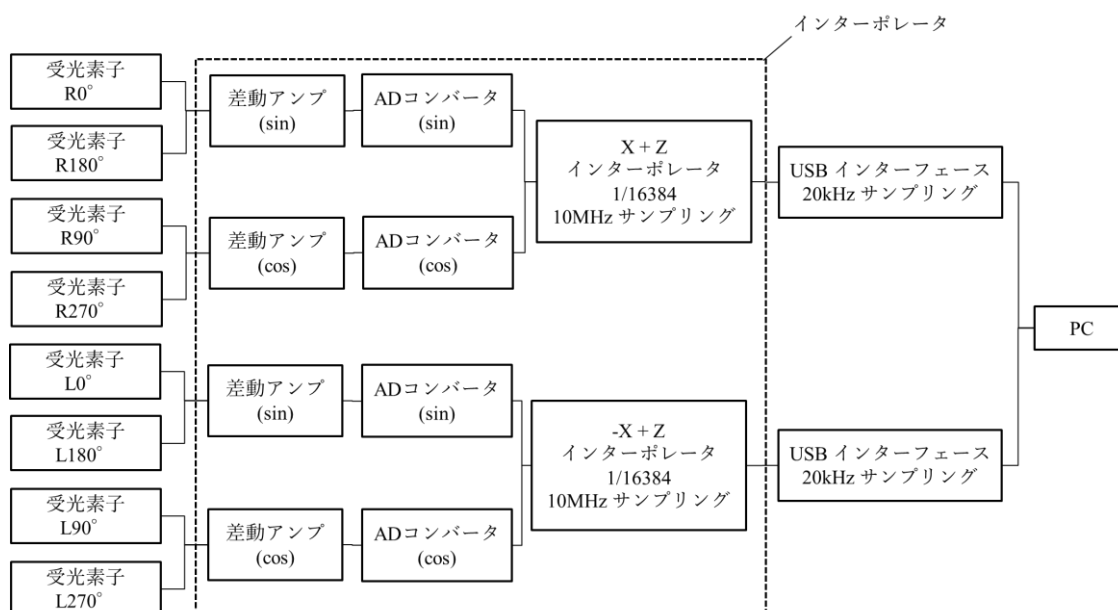


Fig. 4-2-4 位相情報の処理回路のブロック図

4-3 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の実装

XZ 軸上の変位検出における格子干渉計を実装する上で、事前検討した部位の略図を Fig. 4-3-1 に示す。2次元スケールの1格子ピッチは1000 nm、内部に使用したホログラム格子の1格子ピッチは550 nmであり、光源に波長790 nmのマルチモード半導体レーザを用いて2次元スケールに垂直入射するため、回折角 θ_a は約52.2°となる。2次元スケールの基材は、高精度に研磨されたガラスを使用することを前提に、1 mmあたり1 nmを想定した。つまり2次元スケールがX軸上に1 mm移動すると、2次元スケールのたわみによって、2つのビームの入射位置P1とP2で光路長が変化する。2次元スケールに2回入射する本原理では、この移動によって $2 \cdot (1 \text{ nm} + 1 \text{ nm} / \cos 52.2^\circ) = 5.3 \text{ nm}$ の光路長が発生することになる。本格子干渉計の信号周期は、X軸で500 nmであるので、この誤差は $500 \cdot 5.3 / 790 = 3.35 \text{ nm}$ として、X軸上の変位検出におけるリニアリティに影響してしまうことが事前に予測できる。この誤差の予測値は、2-3節で解説したXY軸上の変位検出における格子干渉計のリニアリティの予測値に対し、2.4倍大きな値となっている。これはXY軸上の変位検出における格子干渉計に対し、信号周期が大きいことと、回折角も大きくなっていることが起因している。一方、Z軸方向の信号周期は246 nmであるので、誤差として $246 \cdot 5.3 / 790 = 1.65 \text{ nm}$ となり、Z軸上の変位検出におけるリニアリティに影響してしまうことが事前に予測できる。この誤差の予測値は、3-3節で解説したZ軸上の変位検出における格子干渉計のリニアリティの予測値2 nmに対し、小さい値となる。

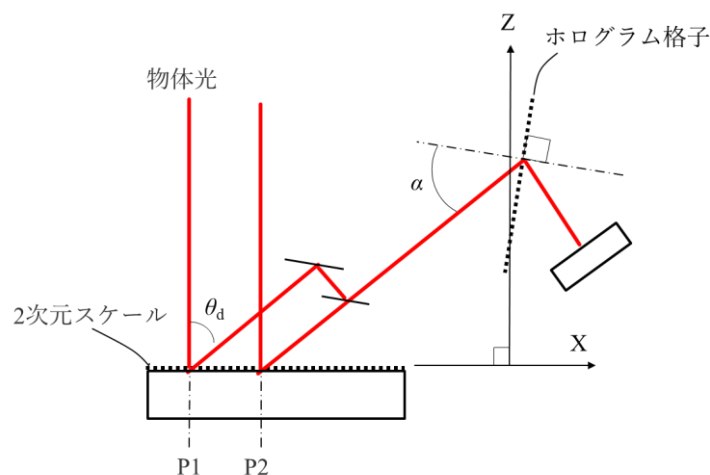


Fig. 4-3-1 2次元スケール上の入射位置とホログラム格子の設置角の略図

もう一つの重要な点としてホログラム格子の設置の角度が挙げられる。物体光の光路長を2次元スケールのZ軸上の移動による光路長の変化を相殺する目的でホログラム格子の設置角度 $\alpha = 45^\circ$ が設定されているが、例えばこのホログラム格子を0.1°の精度で設置した場合、物体光の光路長は、Fig. 4-3-2のシミュレーション結果に示すように、2次元スケール

が、Z 軸上を 1 mm 移動することで約 7000 nm 発生することになる。これを式(1-4-1)に代入し、1°Cの温度における安定性 S を求めると、X 軸上の変位検出で $S = 7000 \cdot 0.3 \cdot 500 / 790^2 = 1.7$ nm、Z 軸上の変位検出で $S = 7000 \cdot 0.3 \cdot 246 / 790^2 = 0.83$ nm となり、X 軸上の変位検出における安定性に与える影響が大きく、ホログラム格子の設置角度 α は、0.01°の精度で設置する必要がある。

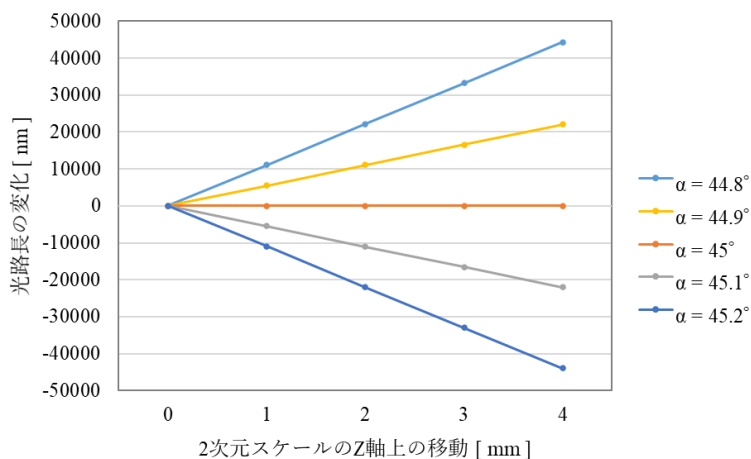


Fig. 4-3-2 ホログラム格子の設置角度 α による光路長の変化の違い

XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の実装外観を Fig. 4-3-3 に示す。各光学部品は、一枚の石英のガラス板上に接着し、縦 40 mm×横 75 mm×厚 15 mm のサイズ内に本格子干渉計を配置することができた。2次元スケールと格子干渉計の筐体の距離であるワーキングディスタンスは、3 mm で設計した。

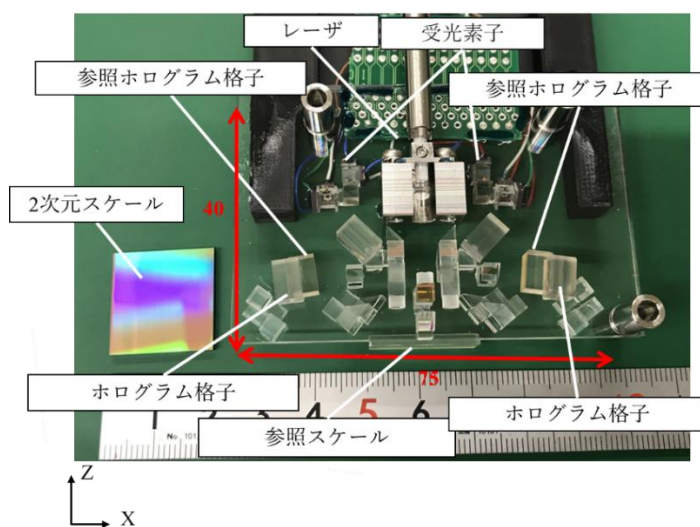


Fig. 4-3-3 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の試作機

格子干渉計の互いに干渉するビームの光路長差について確認をした。左右の格子干渉計の干渉信号の変調率は、光路長の調整時の最大が共に 85 %であることを確認した。これは光路長差によるものではなく、干渉する互いのビームの波面収差によって 100%に到達しないことが分かっている。したがって光路長差を最小にする調整において、信号出力が最大となるところを光路長差がゼロと定義している。

使用したマルチモードの半導体レーザの可干渉性を Fig. 4-3-3 に示し、Fig. 4-3-4 に XZ 軸上の変位検出における格子干渉計のワーキングディスタンス内の出力の変化を示す。

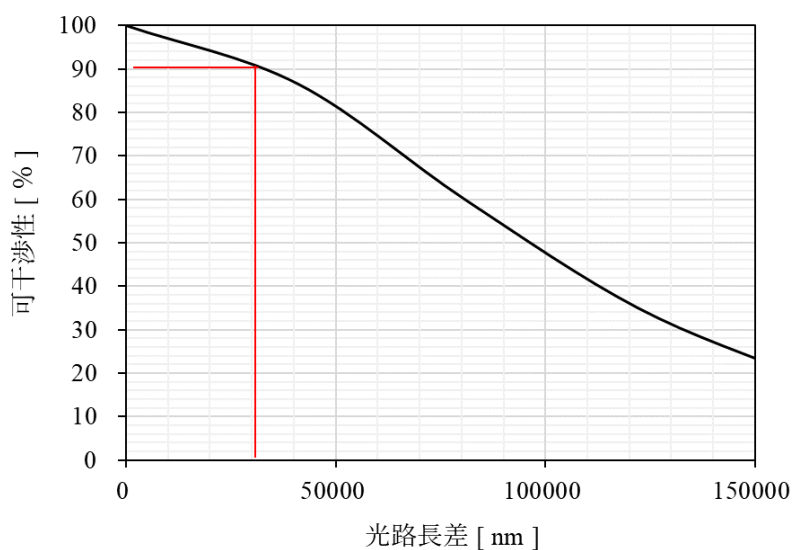


Fig. 4-3-3 使用した半導体レーザの可干渉性

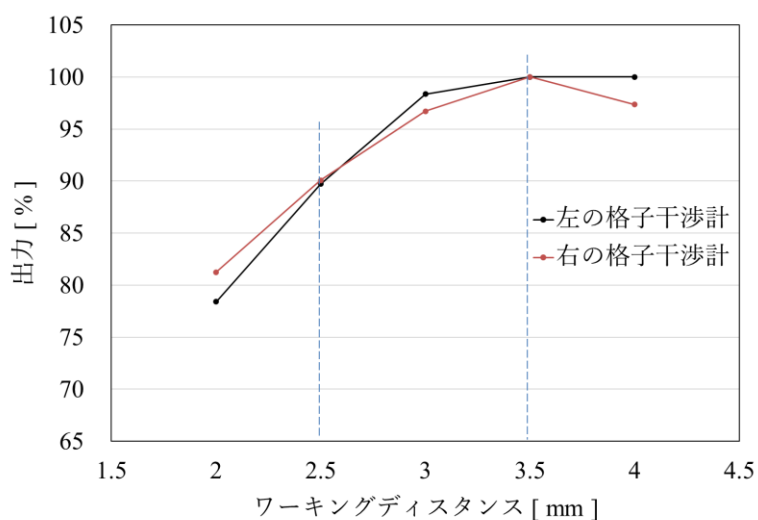


Fig. 4-3-4 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の出力特性

この出力特性の確認には格子干渉計内部のホログラム格子の回折効率のばらつき等も含まれるが、最大出力を 100 % とすると、ワーキングディスタンスが 2.5 ~ 3.5 mm の間で、10 % 低下していた。これは間接的であるが、仮にすべて光路長差による変調率の変化だとすると、本格子干渉計の互いに干渉するビームの光路長差が、Z 軸上の計測範囲 1 mm において 30000 nm 発生したという計算になり、例えば光源の温度が 1°C 変化した場合 $\lambda = 790 \text{ nm}$ 、本半導体レーザは 1°C あたりの波長変化 $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$ であるので、Z 軸で $30000 \cdot 0.3 \cdot 246 / 790^2 = 3.6 \text{ nm}$ の安定性、X 軸上の変位検出において $30000 \cdot 0.3 \cdot 500 / 790^2 = 7.2 \text{ nm}$ の安定性に相当する。これは実装時のホログラム格子の角度等の調整精度に改善の余地があることが考えられる。一方、今回の検証では、計測中の温度管理を $20 \pm 0.05^\circ\text{C}$ にしているが、安定性に与える影響を注意する必要があると考える。

4-4 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の検証

XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の検証では、4-4-1 節で提案した原理の確認として、XZ 軸上の変位検出における分解能と XZ 軸上の変位検出における分解能を 2 次元スケールと組み合わせたリニアリティの計測で確認し、4-4-2 節で格子干渉計の特徴でもある安定性を確認し、4-4-3 節で 2 次元スケールの回転による X 軸 Z 軸回りの回転による XZ 軸上の変位検出について確認を行った。

4-4-1 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の分解能とリニアリティの確認

XZ 軸上の変位検出における格子干渉計に関して、X 軸上の変位検出における分解能とリニアリティを確認した装置を Fig. 4-4-1-1 に示す。これは 3-4-3 節で用いたリニアリティ計測装置を使い、計測誤差は Table 4-4-1 に示している。リニアモータによって駆動された X 軸上のエアステージの上に、リファレンスとなる参照格子干渉計を設置し、計測対象となる 2 次元スケールを参照格子干渉計の計測ライン上に置き、実装した XZ 軸上の変位検出における格子干渉計との比較計測を行った。この際 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計は、X 軸上と Z 軸上の変位を PC によって算出するが、Z 軸上のリファレンスが無いため、その計測結果はあくまでも参考値とする。使用したインターポレータの内挿数は 4000 分割、XZ 軸上の変位検出における本格子干渉計の X 軸上の変位検出における信号周期は 500 nm であるため、その分解能は 125 pm、Z 軸上の変位検出における信号ピッチは 246 nm であるため、その分解能は 61.5 pm、参照格子干渉計の信号周期は 138 nm であるため、その分解能は 38.5 pm、データ取得のサンプリング周波数は 20 kHz とし、ステージの送り速度は 1000 nm/s の条件で計測した。さらに 2 次元スケールをエアステージ上で Z 軸回りに 90° 回転させ 2 次元スケールの Y 軸上についても同様の計測を行い、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の変位と、参照格子干渉計の変位を比較することで、理論どおりの分解能と、X 軸上と Z 軸上の変位検出ができているかを確認した。

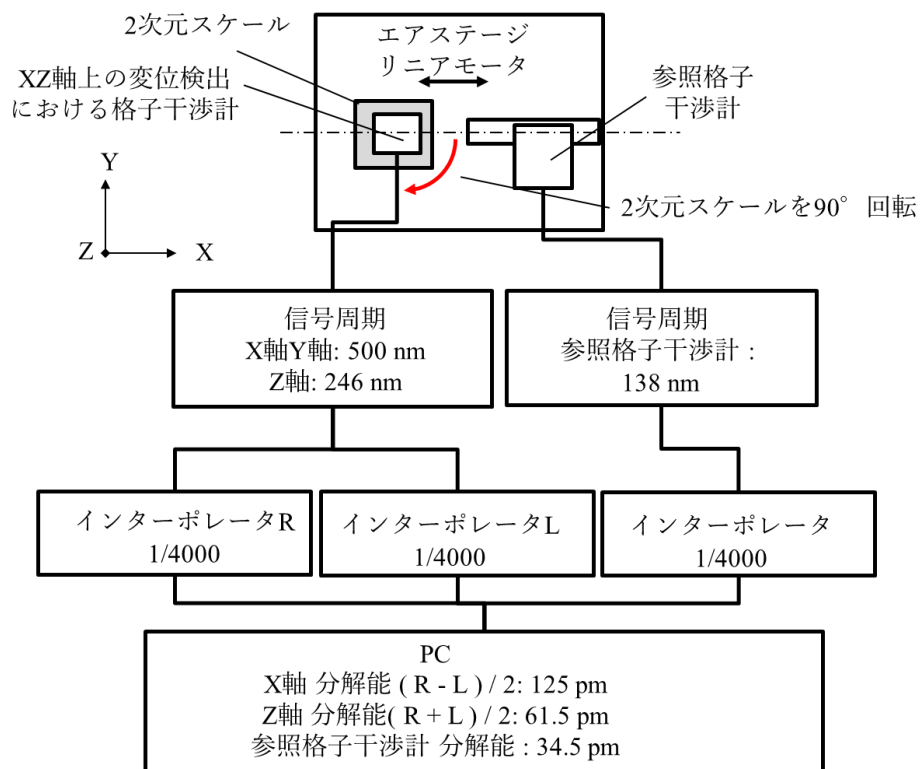


Fig. 4-4-1-1 X 軸上の変位検出における分解能とリニアリティを確認した装置

Table 4-4-1 リニアリティの計測に含まれる誤差

項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の ノイズ (LPF 100 Hz)	A	正規分布	0.03 nm
参照格子干渉計のリニアリティ	B	一様分布	0.29 nm
計測ラインからのずれによるアッペ誤差	A	正規分布	0.17 nm
合成			0.34 nm

XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の X 軸上の変位検出における分解能とリニアリティの確認結果を Fig. 4-4-1-2 に、また、この時の Z 軸上の変位確認結果を Fig. 4-4-1-3 に示す。X 軸上の変位検出における分解能の確認では、2 mm の計測を行ったが、12 nm 以内の累積精度および平均 ± 3.5 nm リニアリティが得られており、理論に合致した分解能となっていることが確認された。またこの時の Z 軸上の計測結果も 2 mm あたり 12 nm の変位であり、X 軸上の変位検出と Z 軸上の変位検出が十分に分離できたと判断できる。さらに、2次

元スケールをエアステージ上で Z 軸回りに 90°回転させ 2 次元スケールの Y 軸上の変位を計測し、Y 軸上の変位検出における分解能とリニアリティの確認結果を Fig. 4-4-1-4 に、その時の Z 軸上の変位確認結果を Fig. 4-4-1-5 に示す。Y 軸上の変位検出における分解能の確認では、2 mm の計測をおこなったが、8 nm 以内の累積精度および平均値 ± 3.5 nm リニアリティが得られており、理論に合致した分解能となっていることが確認された。またこの時の Z 軸上の計測結果も 2 mm あたり 12 nm の変位であり、X 軸上の変位検出と Z 軸上の変位検出が十分に分離できたと判断できる。

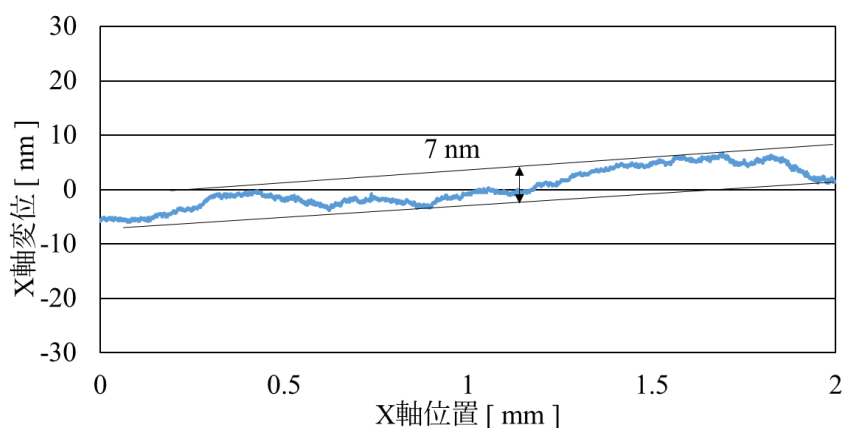


Fig. 4-4-1-2 X 軸上の変位検出における分解能とリニアリティの確認結果

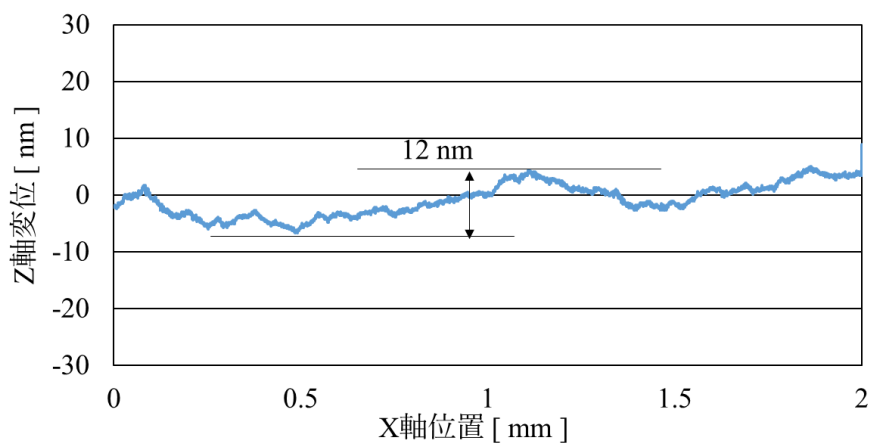


Fig. 4-4-1-3 Z 軸上の変位確認結果

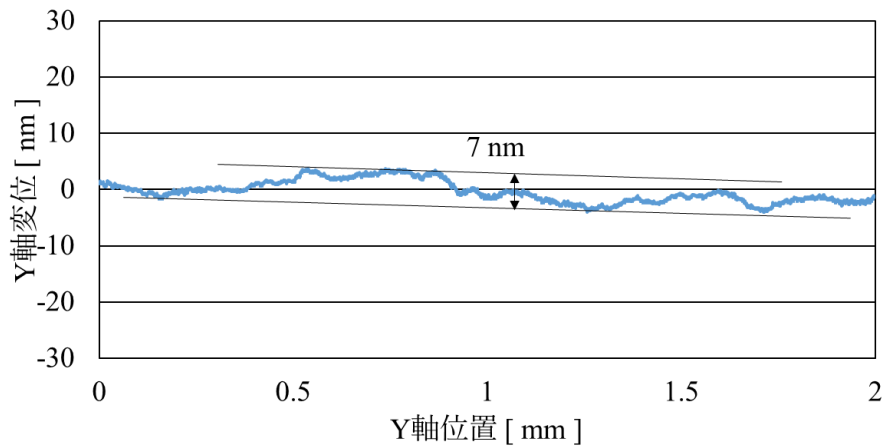


Fig. 4-4-1-4 Y 軸上の変位検出における分解能とリニアリティの確認結果

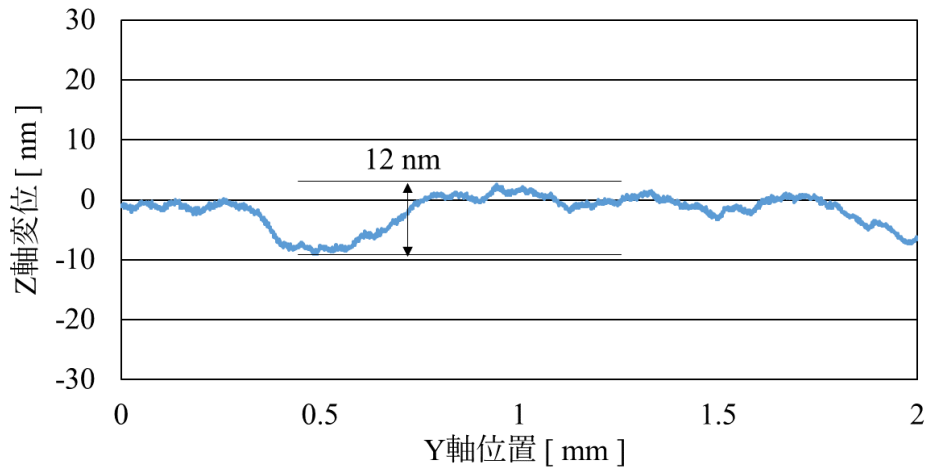


Fig. 4-4-1-5 Z 軸上の変位確認結果

次に XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の Z 軸上の変位検出における分解能とリニアリティを確認したシステム図を Fig. 4-4-1-6 に示す。リニアモータによって駆動されたエアステージの上にリファレンスとなる参照格子干渉計を駆動方向である X 軸上に合わせて固定するところは Fig. 4-4-1-1 と同様であるが、計測対象となる 2次元スケールを X 軸上に対して垂直に立てて置き、参照格子干渉計の計測ラインと、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の変位検出位置が一致するように固定し、Z 軸上の変位を計測した。この際 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計は、X 軸上と Z 軸上の変位を PC によって算出するが、X 軸上のリファレンスが無いため、X 軸上の計測結果はあくまでも参考値とする。その他の計測条件は Fig. 4-4-1-1 と同じである。

XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の Z 軸上の変位検出における分解能とリニアリティの確認結果を Fig. 4-4-1-7 に、その時の X 軸上の変位確認結果を Fig. 4-4-1-8 に示す。Z 軸上の変位検出における分解能の確認では、Z 軸上の 1 mm の計測において平均値 \pm 6.5 nm 以

内の累積精度およびリニアリティとなっており、理論に合致した分解能となっていることが確認された。またこの時の X 軸上の計測結果も 1 mm あたり 24 nm の変位しかないため、X 軸上と Z 軸上の変位検出が十分に分離できていると判断できる。

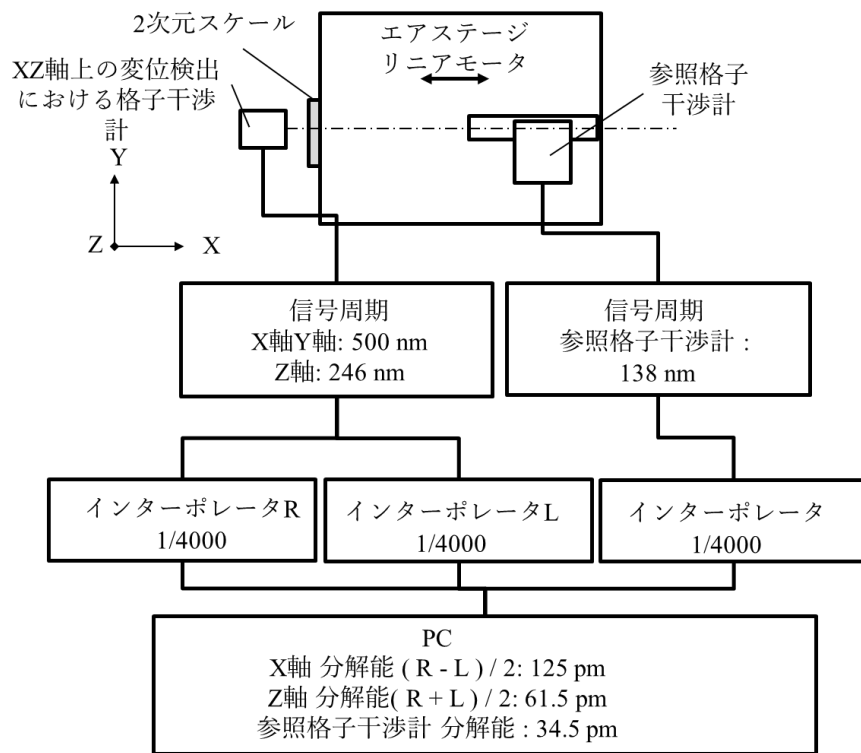


Fig. 4-4-1-6 Z 軸上の分解能とリニアリティを確認した装置構成

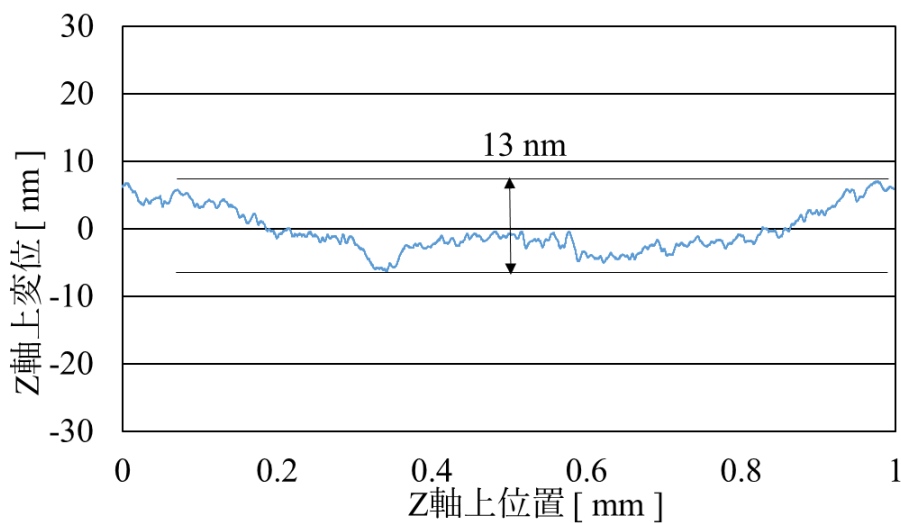


Fig. 4-4-1-7 Z 軸上の変位検出における分解能とリニアリティの確認結果

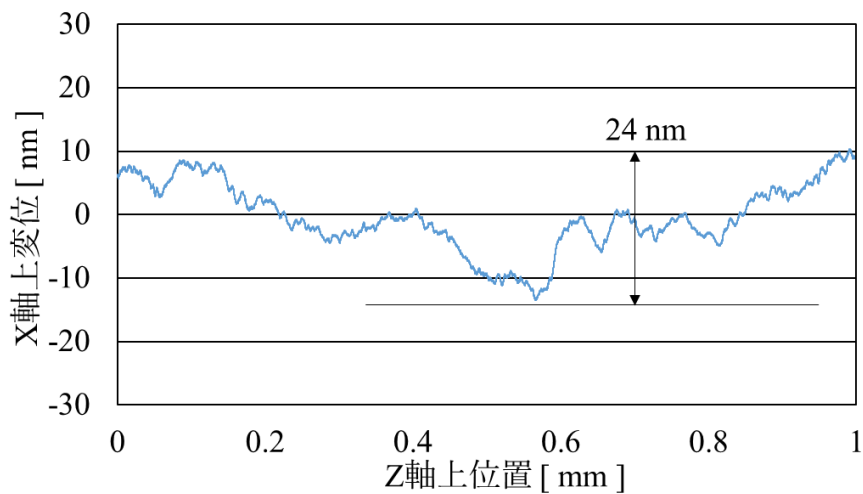


Fig. 4-4-1-8 X 軸上の変位確認結果

4-4-2 安定性の確認

Fig. 4-4-2-1 に安定性の確認に用いた計測システムを示す。XY 軸上の変位検出における格子干渉計と 2 次元スケールは、固定ブロックによって固定され、アクティブ除振台の上に設置した。インターポレータと PC の位置信号処理については、Fig. 4-2-3 と同じであるため、説明を省略する。XY 軸上の変位検出における格子干渉計の分解能は、X 軸上で 30.5 pm, Z 軸上で 15 pm であり、1 s ごとの平均化データを取得した。また温度は $20 \pm 0.05^\circ\text{C}$ にコントロールし、湿度と気圧はコントロールしなかった。

安定性の計測結果を Fig. 4-4-2-2 に、またその時の気圧変化を Fig. 4-4-2-3, 温度変化を Fig. 4-4-2-4 に、湿度変化を Fig. 4-4-2-5 に示す。結果は、1 h において X 軸上の変位検出における安定性で平均値 ± 0.3 nm, Z 軸上の変位検出における安定性で平均値 ± 0.7 nm となり、Z 軸上の変位検出に関しては Table 1-4-2 で目標としていた安定性平均値 ± 1 nm を満たすことが確認されたが、X 軸上の変位検出における安定性に関しては、目標としていた平均値 ± 0.2 nm に対し、平均値 ± 0.3 nm ということで満たすことができなかった。考えられる要因としては、今回の実装状態における検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差が最大で 30000 nm あると 4-3 節で推測されたため、安定性に対し最も支配的になる半導体レーザの温度 0.1°C あたりの波長変化 $\Delta\lambda = 0.03$ nm を式(1-4-1)に代入すると、X 軸上の変位検出における安定性は、最大で $S = 30000 \cdot 0.03 \cdot 500 / 790^2 = 0.7$ nm になると考えられ、検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差の調整における調整精度が、不十分であったと推測される。

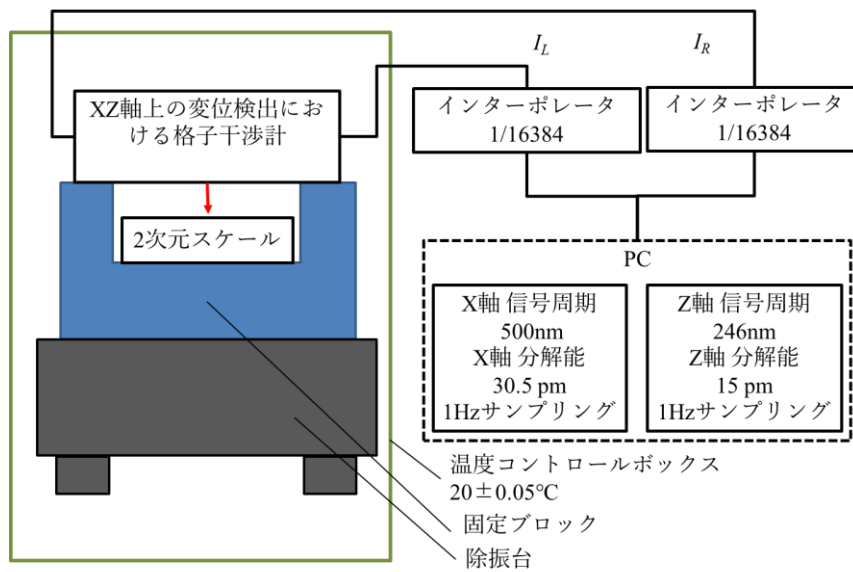


Fig. 4-4-2-1 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の安定性確認システム

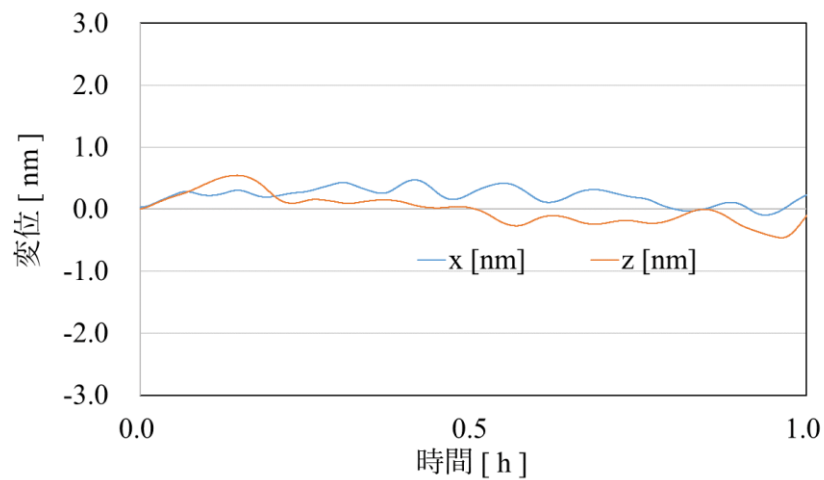


Fig. 4-4-2-2 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の安定性計測結果

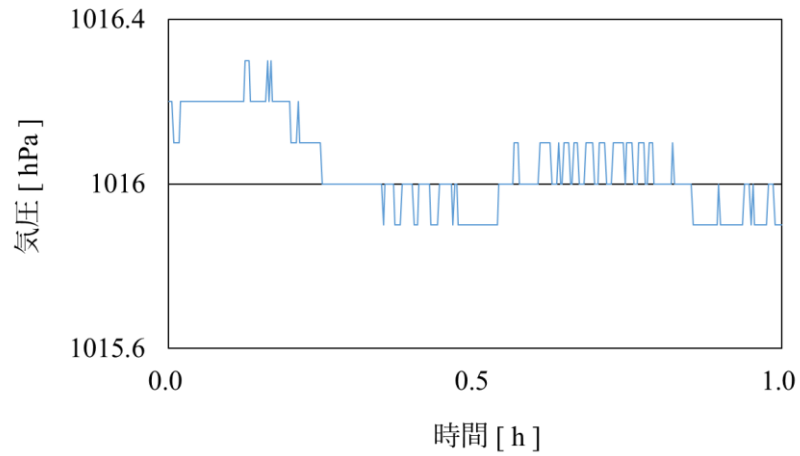


Fig. 4-4-2-3 安定性計測時の気圧変化

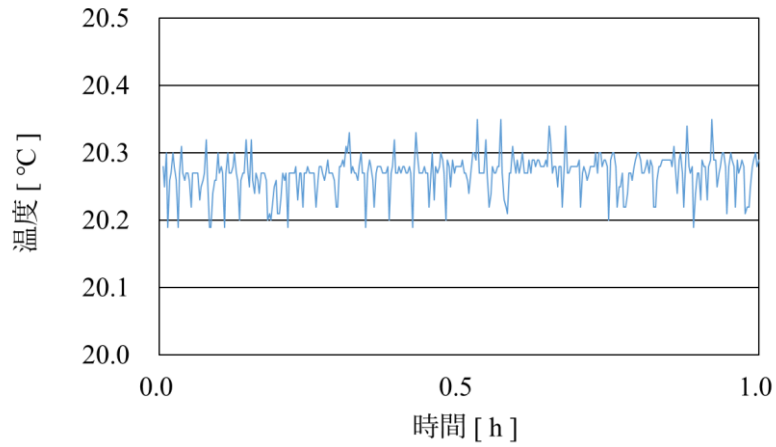


Fig. 4-4-2-4 安定性計測時の温度変化

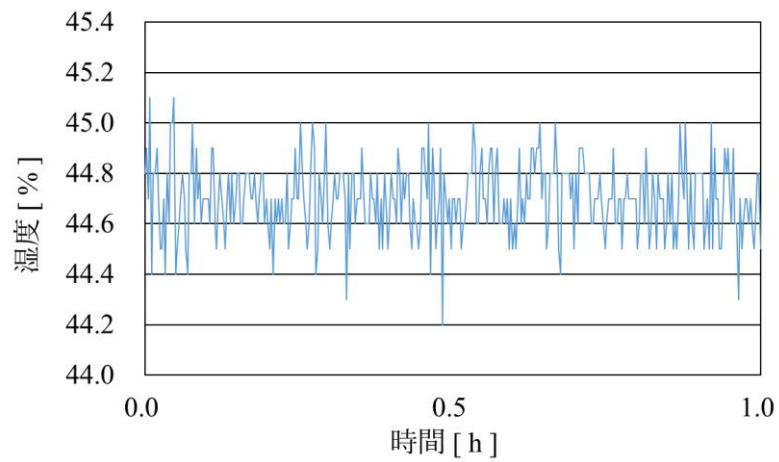


Fig. 4-4-2-5 定性計測時の湿度変化

4-4-3 2次元スケールの回転による誤差の確認

XZ 軸上の変位検出における格子干渉計は、2次元スケールの X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの回転に対しても正確な X 軸上と Z 軸上の変位検出をする必要がある。3-4-4 節で説明したように、2次元スケールが装着される半導体の製造装置では、ウェハの平面に合わせてステージ自体の姿勢を変化させるため、使用用途によっては、 0 ± 0.1 mrad の姿勢変化をさせることが想定される。一方ステージ制御には、この姿勢変化に影響なく X 軸上と Z 軸上の変位検出が要求され、この姿勢変化による X 軸上と Z 軸上の変位検出の誤差が大きい場合には、少なくとも 3 つの位置で Z 軸上の変位検出を行うことでステージの姿勢変化量を検出し、その角度に伴った誤差の補正を各格子干渉計に対し行うこととなり、ステージ制御がさらに複雑化するからである。

Fig. 4-4-3-1 に 2次元スケールの X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの回転による誤差の確認に使用した計測装置を示し、Fig. 4-4-3-2 に装着された XZ 軸上の変位検出における格子干渉計と 2次元スケールの外観を示す。リニアモータによって制御されたエアステージの上に 2次元スケールをエアステージの移動方向に対し垂直に置き、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の検出位置が、リファレンスとなる参照格子干渉計の計測ラインと一致するように固定し、エアステージの移動方向である Z 軸上と、それに垂直な X 軸上の変位を計測する。エアステージのストロークは 1 mm で送り速度は 0.1 mm/s とした。計測のリファレンスとして使用した参照格子干渉計は、1 mm あたりのリニアリティが平均値 ± 0.5 nm のスケールを使用した。また本計測には、Table 4-4-1 に示したように、2次元スケールを計測した際の XZ 軸上の変位検出における格子干渉計のノイズ、参照格子干渉計のリニアリティ、本格子干渉計の計測ラインと参照格子干渉計の計測ラインのずれから生じるアッペエラーが含まれている。また参照格子干渉計のノイズは 100 Hz のローパスフィルタ処理後で 10 pm 以下となるため無視する。この計測に使用したインターポレータの内挿数は 4096 分割である。

2次元スケールの X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの回転は、それぞれ 0 ± 0.125 mrad とし、X 軸回りの回転と Y 軸回りの回転はオートコリメータ 1 を用いて、2次元スケールに対し平行につけられたミラーの表面の回転量を確認し、Z 軸回りの回転はオートコリメータ 2 を用いて 2次元スケールの端面の回転量を確認した。オートコリメータ 1 とオートコリメータ 2 は、ファイブラボ(株)製 HAWK - 204 で、その計測再現性は 0.005 mrad であった。また Fig. 4-4-3-3 に 2次元スケールの各回転軸の表記の定義を示した。

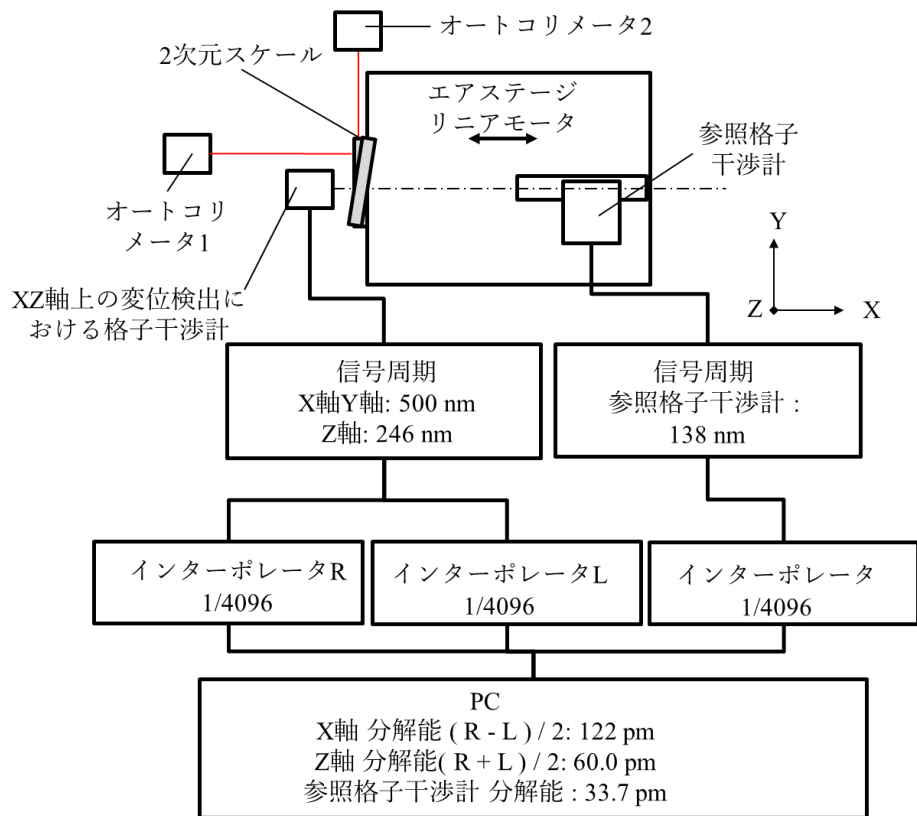


Fig. 4-4-3-1 平面スケールの回転による誤差の確認システム

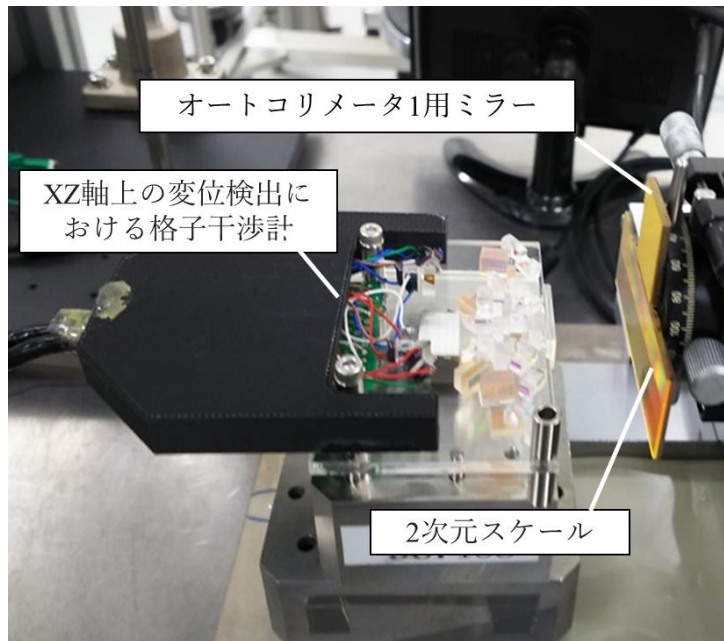


Fig. 4-4-3-2 平面スケールの回転による誤差の確認システム外観

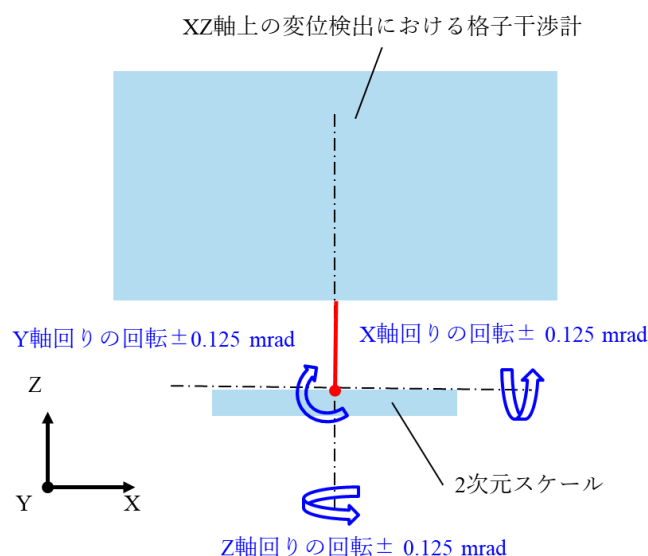


Fig. 4-4-3-3 2次元スケールの各回転軸の定義

Fig. 4-4-3-4 に2次元スケールの回転が無い状態でのZ軸上の変位検出におけるリニアリティと、X軸上の変位検出の変位を示す。結果は、Z軸上のリニアリティ計測結果は、1mm移動に対し平均値 ± 5 nmが得られており、その時のX軸上の変位は 0 ± 4 nmであった。

次に2次元スケールをX軸回りに $+0.125$ mrad回転させた結果を**Fig. 4-4-3-5**、X軸回りに -0.125 mrad回転させた結果を**Fig. 4-4-3-6**に示す。X軸回り $+0.125$ mrad回転させた結果は、Z軸上の変位検出におけるリニアリティが平均値 ± 5 nmとなっていた。一方、X軸回りに -0.125 mrad回転させた結果でも、Z軸上の変位検出におけるリニアリティが、平均値 ± 8 nmとなっていた。

続いて2次元スケールをY軸回りの回転に $+0.125$ mrad回転させた結果を**Fig. 4-4-3-7**、Y軸回りに -0.125 mrad回転させた結果を**Fig. 4-4-3-8**に示す。Y軸回りに $+0.125$ mrad回転させた結果では、X軸上の変位が 0 ± 5 nmであったのに対し、Z軸上のリニアリティが平均値 ± 10 nmに増えた。一方、Y軸回りに -0.125 mrad回転させた結果でも、Z軸上のリニアリティ計測結果が平均値 ± 8 nmに増えていることを確認した。

2次元スケールをZ軸回りに $+0.125$ mrad回転させた結果を**Fig. 4-4-3-9**、Z軸回りに -0.125 mrad回転させた結果を**Fig. 4-4-3-10**に示す。Z軸回りに $+0.125$ mrad回転させた結果では、Z軸上のリニアリティ計測結果もX軸上の変位も 0 ± 5 nmに入っていた。一方、Z軸回りに -0.125 mrad回転させた結果も、Z軸上のリニアリティ計測結果が平均値 ± 6 nmとなり大きな変化は見られなかった。

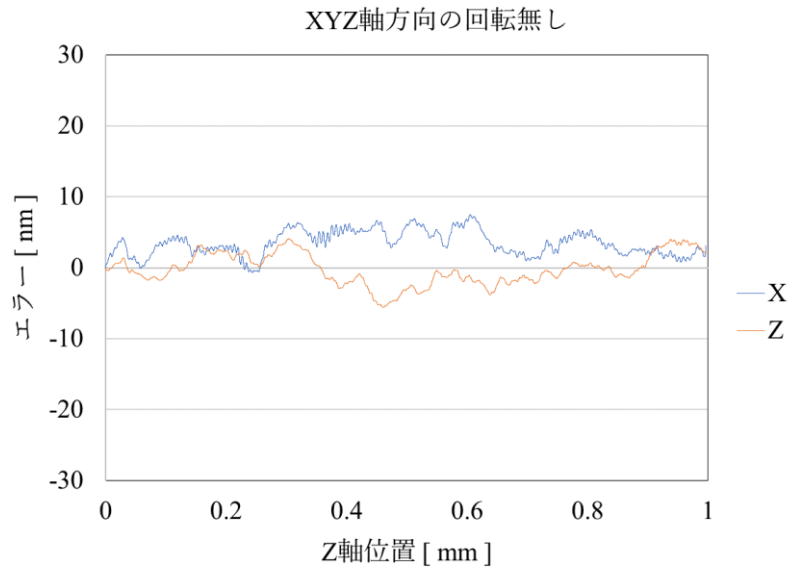


Fig. 4-4-3-4 スケールの回転が無い場合の Z 軸上のリニアリティと X 軸上の変位

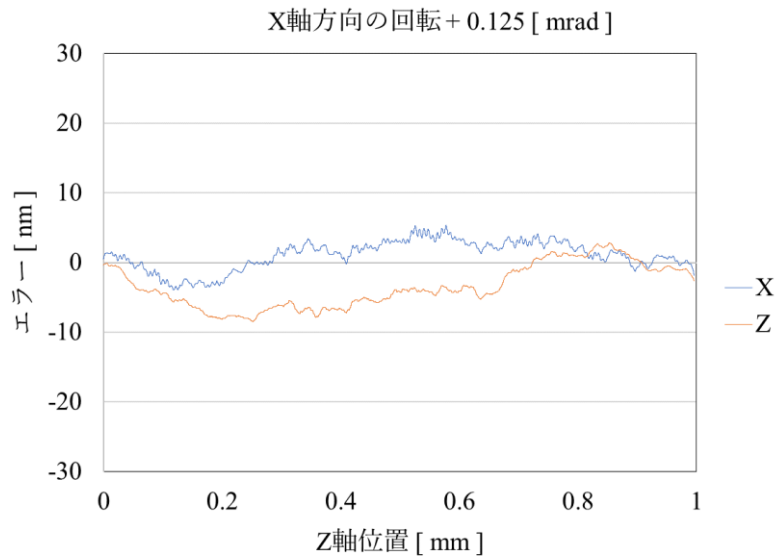


Fig. 4-4-3-5 X 軸回り+0.125 mrad 回転した状態の Z 軸上のリニアリティと X 軸上の変位

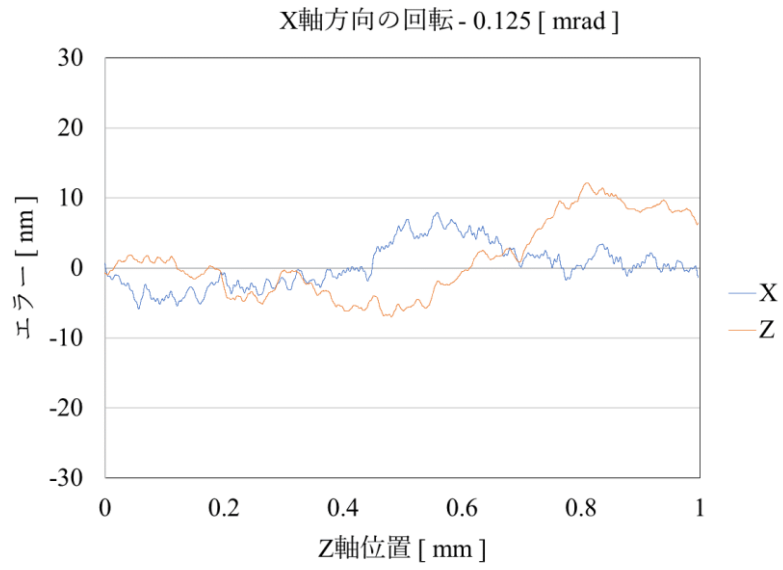


Fig. 4-4-3-6 X 軸回り - 0.125 mrad 回転した状態の Z 軸上のリニアリティと X 軸上の変位

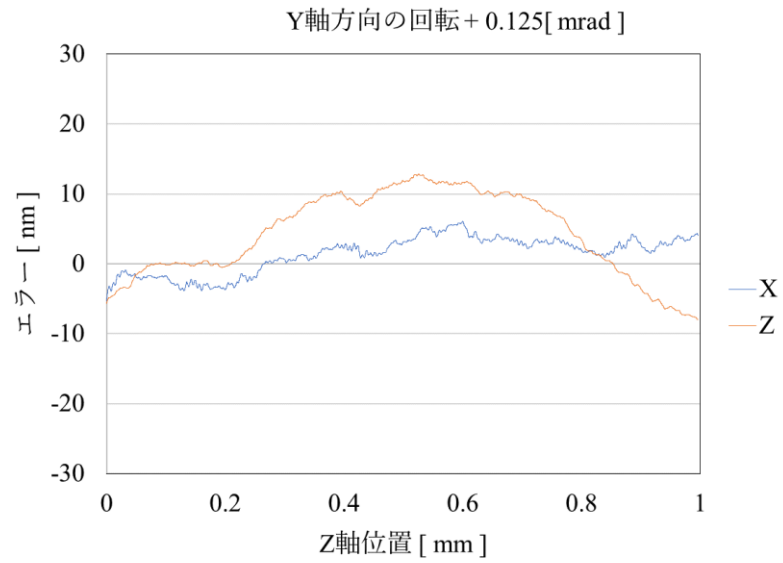


Fig. 4-4-3-7 Y 軸回り + 0.125 mrad 回転した状態の Z 軸上のリニアリティと X 軸上の変位

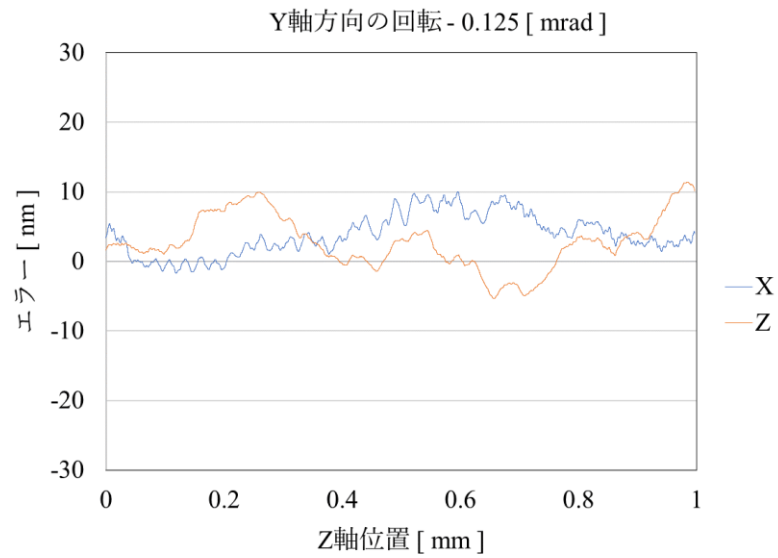


Fig. 4-4-3-8 Y 軸回り -0.125 mrad 回転した状態の Z 軸上のリニアリティと X 軸上の変位

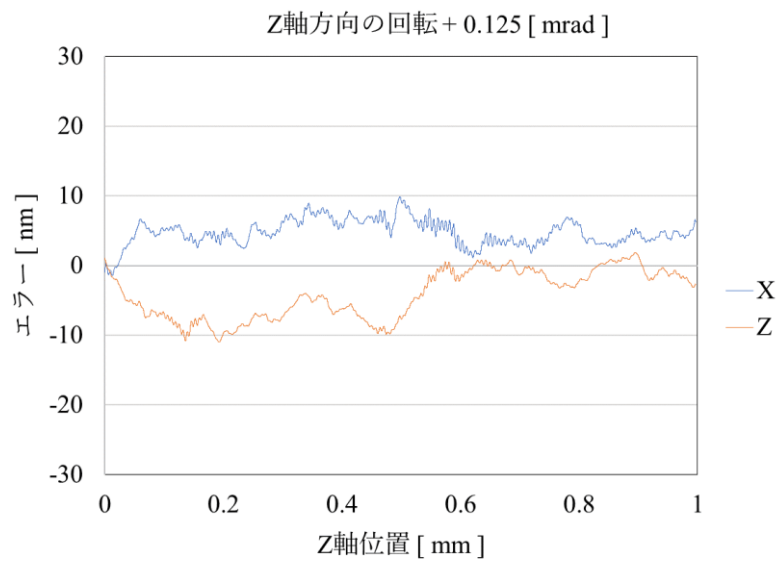


Fig. 4-4-3-9 Z 軸回り +0.125 mrad 回転した状態の Z 軸上のリニアリティと X 軸上の変位

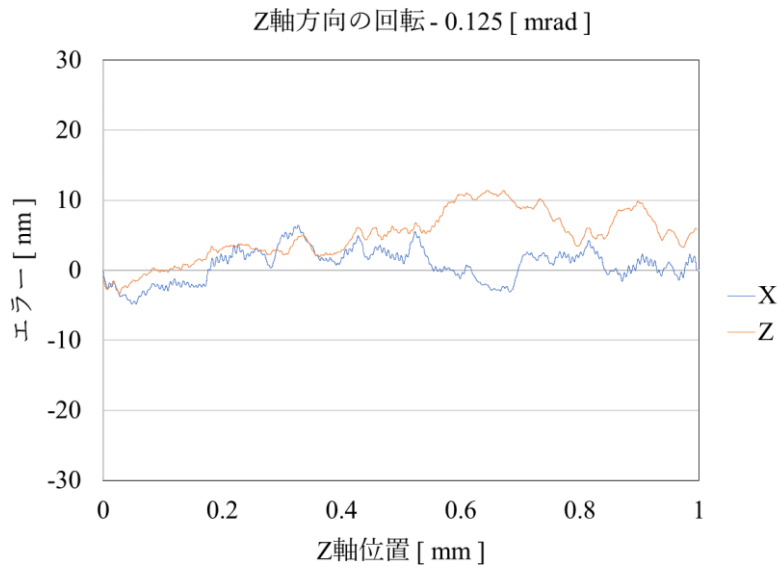


Fig. 4-4-3-10 Z 軸回り - 0.125 mrad 回転した状態の Z 軸上のリニアリティと X 軸上の変位

4-5 結言

本章では、新規に XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の原理を提案し、実装によって、X 軸上の変位検出で 0.04 nm 以下、Z 軸上の変位検出で 0.2 nm 以下の検出分解能と、1 mm の Z 軸上の検出範囲と、X 軸上の変位検出と Z 軸上の変位検出における 2 次元スケール上の検出位置の一致を実現させ、実装によって基本性能を確認した。検証結果を Table 4-5-1 にまとめる。信号周期は設計どおり X 軸上の変位検出で 500 nm、Z 軸上の変位検出で 246 nm を得ていた。リニアリティは X 軸上の変位検出で平均値 \pm 3.5 nm、Z 軸上の変位検出で 0 ± 6.5 nm を実現していた。1 h の安定性も X 軸上の変位検出において平均値 \pm 0.3 nm、Z 軸上の変位検出において平均値 \pm 0.7 nm を得ており、格子干渉計の特徴である環境起因に依存しない高い計測安定性計を確認した。

一方、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の 2 次元スケールの回転による誤差を Table 4-5-2 にまとめる。2 次元スケールの X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの回転において、Y 軸回りの回転のみに関して、Z 軸上の変位検出におけるリニアリティに変化を確認した。X 軸上の変位に変化が見られないことから、2 次元スケールの回転によって Z 軸上の変位検出におけるリニアリティにのみ影響する要素があると考えられる。2 次元スケールの Y 軸回りの回転は、4-3 節で予測した 2 次元スケールのたわみの影響と共通する誤差であり、本格子干渉計の光路は、2 次元スケールによる回折角が大きいことと、左右の格子干渉計の復路の光路において 2 次元スケールへのビーム入射位置が、往路に対し離れていることで、光路長差が拡大され、リニアリティに影響を与えたとも考えられる。今回 Z 軸上のリニアリティの性能に関しては、3 次元計測において重要項目としていないため、今後小型化によって、

左右の格子干渉計の復路の光路における 2 次元スケールへのビーム入射位置を往路に対し近づけた際の改善効果を確認していきたい。しかしながら X 軸上の変位については、2 次元スケールの X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの回転において、Z 軸上の計測範囲 1 mm で、計測結果の 2 乗和平方根が 0 ± 10 nm 以内であることから、XY 平面に対する Z 軸上の変位検出における正規直交性は、 $90^\circ \pm 0.01$ mrad が得られていると言える。

Table 4-5-1 XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の検証結果

確認項目		結果
信号周期	X 軸	500 nm
	Z 軸	246 nm
分解能 (16384 内挿)	X 軸	30.5 pm
	Z 軸	15 pm
ワーキングディスタンス	Z 軸	3 mm
計測の範囲	Z 軸	1 mm
リニアリティ	X 軸	平均値 \pm 3.5 nm / mm
	Z 軸	平均値 \pm 6.5 nm / mm
1h の安定性	X 軸	平均値 \pm 0.3 nm
	Z 軸	平均値 \pm 0.7 nm

Table 4-5-2 2次元スケールの XYZ 軸方向の回転による Z 軸リニアリティと X 軸上の変位

2次元スケールの回転	結果	
XYZ 軸方向の回転無し	Z 軸上のリニアリティ	平均値 \pm 5 nm
	X 軸上の変位	0 ± 4 nm
X 軸方向の回転 ± 0.125 mrad	Z 軸上のリニアリティ	平均値 \pm 8 nm
	X 軸上の変位	0 ± 5 nm
Y 軸方向の回転 ± 0.125 mrad	Z 軸上のリニアリティ	平均値 \pm 10 nm
	X 軸上の変位	0 ± 5 nm
Z 軸方向の回転 ± 0.125 mrad	Z 軸上のリニアリティ	平均値 \pm 6 nm
	X 軸上の変位	0 ± 5 nm
XY 平面に対する Z 軸方向の正規直交性	\tan^{-1} (X 軸上の変位 / mm)	$90^\circ \pm 0.01$ mrad

以上の検証結果から、リニアリティの改善の観点から、格子干渉計の往復路の 2 次元スケールへのビーム入射位置の最小化が課題に残るものの、XY 軸上の変位検出における格子干渉計を提案し、実装により基本的な動作と性能および具体的な課題が確認できたため、本章

の目的は達成できたと判断する。

また Fig. 4-5-1 に示すよう、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計に対し、Z 軸回りに 90°回転させた YZ 軸上の変位検出における格子干渉計を追加することにより、2次元スケールの Y 軸上の変位検出も可能となる。さらに XZ 軸上の検出位置と YZ 軸上の検出位置を一致させることも可能となる。この場合は Fig. 4-5-2 に示すシステム構成をとることで、XYZ 軸上の変位検出をおこなう 3次元エンコーダが実現できる。

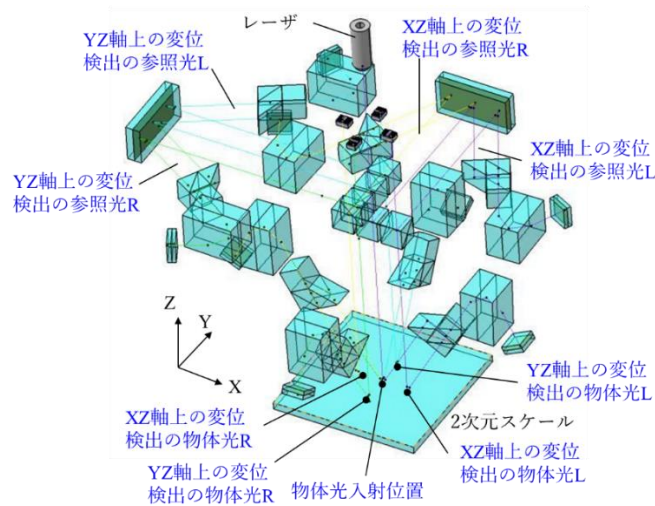


Fig. 4-5-1 3次元エンコーダの光学系の配置

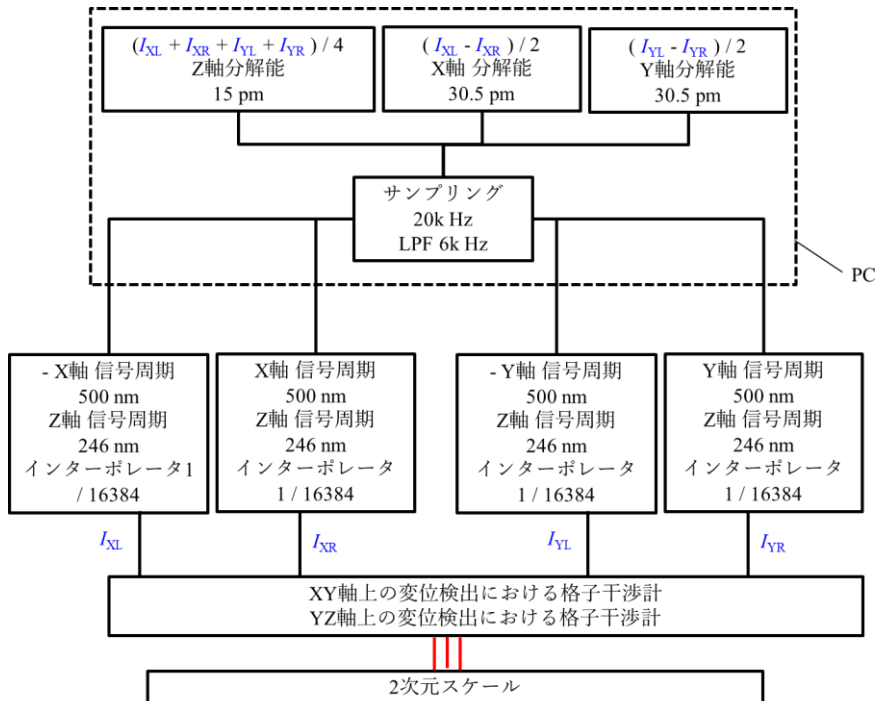


Fig. 4-5-2 3次元エンコーダのシステム構成図

第5章 開発された3次元エンコーダの性能比較

5-1 緒言

本研究は、安定したXYZ軸上の変位検出を可能にした格子干渉計を新たに提案し、Z軸上の変位検出は1mmの計測範囲を有し、サブナノレベルの高分解能なXYZ軸上の変位検出における3次元エンコーダを実現させることを目的としており、その方法として、**Fig.5-1-1**に示すように、既に実現しているXY軸上の変位検出における格子干渉計と本研究で開発したZ軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせる方法と、XZ軸上の変位検出における格子干渉計をYZ軸上の変位検出における格子干渉計にも適用させる方法を前提に、それぞれの基本性能について検証を行ってきた。

本章では、前記2つの方法の検証結果を用いて、3次元エンコーダを構成した場合の性能比較を行い、本研究で提案したZ軸上の変位検出における格子干渉計を検討する上で、検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差を発生させない原理提案方法によって実現した3次元エンコーダの、従来技術に対する優位性や課題を示す。

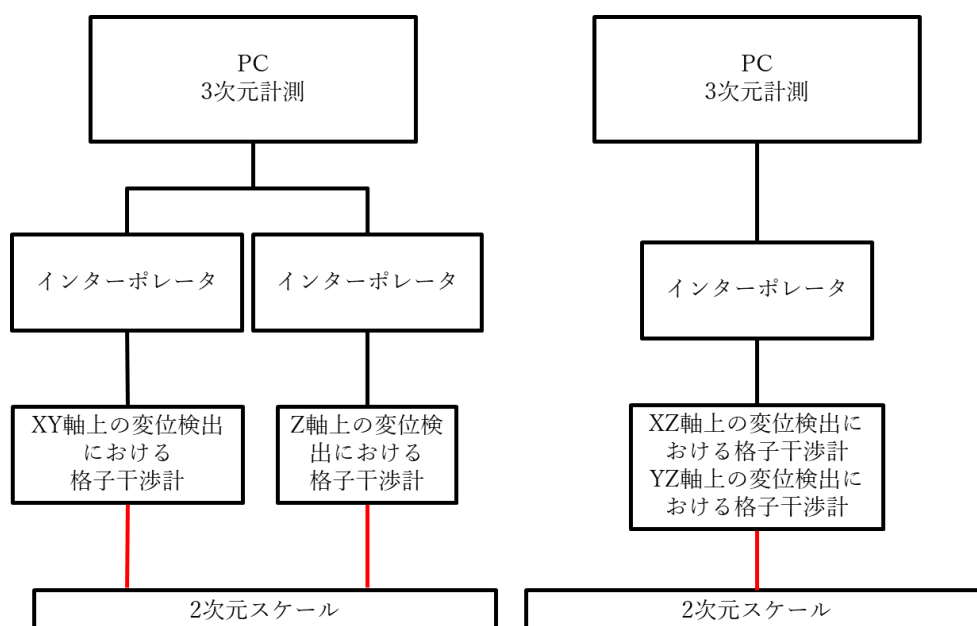


Fig. 5-1-1 3次元エンコーダの構成案

5-2 開発した3次元エンコーダの性能

これまでに開発した格子干渉計をXYZ軸上の変位検出における格子干渉計に展開した場合の基本性能を**Table 5-2-1**にまとめる。これまでの評価結果は、すべて1格子ピッチ1000nmの2次元スケールを使用しており、安定性の確認は、同じ計測環境で計測された。つま

り XY 軸上の変位検出における格子干渉計と本開発の Z 軸上の変位検出における格子干渉計と、本開発の XZ 軸上の変位検出を YZ 軸上にも適用させた格子干渉計は、同じ計測条件下の比較であると考えられる。XY 軸上の変位検出における格子干渉計と本開発の Z 軸上の変位検出における格子干渉計の基本性能は、Table 2-5-1 と Table 3-5-1 の結果を引用した。本開発の XZ 軸上の変位検出を YZ 軸上にも適用させた格子干渉計の基本性能は、Table 4-5-1 と Table 4-5-2 の結果を引用した。

開発した格子干渉計の Z 軸上の変位検出範囲 1 mm における検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差 L_z の発生に関しては、本開発の Z 軸上の変位検出における格子干渉計で、計測範囲 8 mm において $L_z \leq 15000$ nm を達成しており、広い計測範囲で目標の安定性が見込めることが確認された。一方、本開発の XZ 軸上の変位検出における格子干渉計に関しては、Z 軸上の計測範囲 1 mm における検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差 L_z が $L_z \leq 30000$ nm 変化する可能性があり、実装時のホログラム格子の設置角の調整精度に課題が残った。しかし Table 1-4-1 に示した従来技術と比較すると非常に小さな光路長差 L_z を実現したと言える。

XY 軸上の変位検出における格子干渉計と本開発の Z 軸上の変位検出における格子干渉計と、本開発の XZ 軸上の変位検出を YZ 軸上にも適用させた格子干渉計の X 軸上の変位検出における分解能は、共に目標の 40 pm 以下を実現した。一方、Z 軸上の変位検出における分解能も、共に目標の 0.2 nm 以下を実現した。Z 軸上の変位検出における計測範囲に関しても目標である 1 mm の達成と、それを実現するための十分なワーキングディスタンスを得ることができた。

XY 軸上のリニアリティの比較に関しては、XY 軸上の変位検出における格子干渉計と Z 軸上の変位検出における格子干渉計の組み合わせにおいて X 軸および Y 軸で平均値 ± 0.2 nm/mm、Z 軸で平均値 ± 1.6 nm/0.75 mm であり、非常に優れた性能が得られることが見込まれた。一方、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計と YZ 軸上の変位検出における格子干渉計の組み合わせでは平均値 ± 3.5 nm/mm、Z 軸で平均値 ± 6.5 nm/0.75 mm と劣る結果となった。この理由に関して考察すると、2-3 節で説明した XY 軸上の変位検出における格子干渉計の原理では、2次元スケールのたわみによる、X 軸上の 1 mm あたりのリニアリティにおよぼす影響が 1.39 nm と予測したのに対し、4-3 節で説明した XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の原理では、X 軸上の 1 mm あたりのリニアリティにおよぼす影響が 3.35 nm になるというように、原理的に誤差が 2.4 倍拡大されることが想定される。これは XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の信号周期 500 nm が、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の信号周期 250 nm に対し大きいことと、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計のスケールによる回折角 52.2° が、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の回折角 23.3° に対し大きいことが起因している。

もう一つは XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の光路において、往路の 2次元スケールへの入射位置と、復路の入射位置の距離に起因する。今回のこの距離は Fig. 5-2-1 に示す

ように、XY 軸上の変位検出における格子干渉計の P1 と P2 間の距離に対し、今回実装した XZ 軸上の変位検出における格子干渉計の P2 と P3 間の距離は 2.4 倍大きい。使用したエアステージの 1 mm 区間でのピッチングは、オートコリメータによって 0.1"であることを確認したが、XY 軸上の変位検出における格子干渉計では、5 mm 離れた 2 点間では 2.4 nm に相当し、光路長差に換算すると、 $2 \cdot 2 \cdot 2.4 \text{ nm} / \cos 23.3^\circ = 10.5 \text{ nm}$ になり、これをリニアリティに換算すると $250 \cdot 10.5 / 790 = 3.3 \text{ nm}$ の影響と考えられる。一方、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計では、12 mm 離れた 2 点間では 5.8 nm に相当するため、光路長に換算すると、 $2 \cdot (5.8 \text{ nm} + 5.8 \text{ nm} / \cos 52.2^\circ) = 30.5 \text{ nm}$ になり、これをリニアリティに換算すると $500 \cdot 30.5 / 790 = 19.3 \text{ nm}$ の影響と考えられる。したがってステージのピッチングの影響に関しては、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計は、XY 軸上の変位検出における格子干渉計に対し、誤差が 5.8 倍拡大される可能性がある。これらリニアリティの計測結果に影響したことは十分に考えられ、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計のリニアリティを改善するには、例えば P2 と P3 間の距離を 2 mm まで小さくすることで、この 5.8 倍の誤差拡大は低減できると考える。また 1 格子ピッチの拡大と分解能はトレードオフになり、全体の最適化が必要になるが、2 次元スケールの 1 格子ピッチを大きくすることで、回折角 θ_d を小さくして 2 次元スケールのたわみによる影響を軽減する改善策も残される。

安定性に関して目標であった平均値 $\pm 0.2 \text{ nm} / \text{h}$ をわずかに達成することができず、平均値 $\pm 0.3 \text{ nm} / \text{h}$ となった。格子干渉計の特徴である安定性を得るためには、物体光と参照光の光路長が正確に合わせられ、環境変化による影響をキャンセルさせる必要がある。4-3 節の干渉信号の出力変化による検証で説明したように、格子干渉計の互いに干渉するビームの光路長差が、固定した 2 次元スケールの Z 軸上の位置によって発生してしまった可能性が高い。実装された格子干渉計の互いに干渉するビームの光路長差の実測値が $L_z = 30000 \text{ nm}$ であったため、 0.1°C の温度変化における安定性 S は、 $S = 30000 \cdot 0.03 \cdot 500 / 790^2 = 0.72 \text{ nm}$ と考えられる。これはホログラム格子の設置角の調整精度によって改善できるため、大きな課題とはならないと考える。これらの結果から高精度な XYZ 軸上の変位検出を行う 3 次元エンコーダの実現という観点では、現状 XY 軸上の変位検出における格子干渉計と Z 軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせた方法が、改善点がほとんど無いことから実現し易いと考察できる。

正規直交性に関しては、2 次元スケールによる XY 軸上の精度確認結果から $90^\circ \pm 0.001 \text{ mrad}$ となっており、今後 2 次元スケールを用いた正規直交性の計測は、新たな計測方法として産業機器の高精度化^[57,58]に貢献できると考えられる。

Table 5-2-1 3次元エンコーダの構成による性能比較

比較項目		目標 Table 1-4-2	2次元スケール(1格子ピッチ 1000 nm) を用いた3次元エンコーダの構成	
			XY軸上の変位検出における 格子干渉計	XZ軸上の変位検出における 格子干渉計
			Z軸上の変位検出における 格子干渉計	YZ軸上の変位検出における 格子干渉計
			引用データ Table 2-5-1, Table 3-5-1	引用データ Table 4-5-1, Table 4-5-2
Z軸上の変位検出における光路長差の発生	ΔL_z	Z軸上安定性 0 ± 1 nm Z計測範囲 1 mm 温度変化 1°C	$0 \pm 1 \geq L_z \cdot 0.3 \cdot 138 / 790^2$ 目標: $L_z \leq 0 \pm 15075$ nm 検証結果: $L_z \leq 0 \pm 15000$ nm / 8 mm	$0 \pm 1 \geq L_z \cdot 0.3 \cdot 246 / 790^2$ 目標: $L_z \leq 0 \pm 8457$ nm 検証結果: $L_z \leq 0 \pm 30000$ nm / 1 mm
信号周期	X, Y	-	250 nm	500 nm
	Z	-	138 nm	246 nm
分解能 16384内挿	X, Y	40 pm	15.3 pm	30.5 pm
	Z	0.2 nm	8.4 pm	15 pm
ワーキングディスタンス	Z	3 mm 以上	Z軸上の変位検出: 6.4 ~ 14.4 mm XY軸上の変位検出: 2.5 ~ 3.5 mm	2.5 ~ 3.5 mm
計測の範囲	Z	1 mm 以上	Z軸上の変位検出: 8 mm XY軸上の変位検出: 1 mm	1 mm
リニアリティ	X, Y	平均値 \pm 0.2 nm / mm	平均値 \pm 0.2 nm / mm	平均値 \pm 3.5 nm / mm
	Z	-	平均値 \pm 1.6 nm / 0.5 mm	平均値 \pm 6.5 nm / 0.5 mm
1 hの安定性	X, Y	平均値 \pm 0.2 nm	平均値 \pm 0.2 nm	平均値 \pm 0.3 nm
	Z	平均値 \pm 1 nm	平均値 \pm 0.7 nm	平均値 \pm 0.7 nm
正規直交性	X, Y	-	$90^\circ \pm 0.001$ mrad	$90^\circ \pm 0.001$ mrad
	Z	-	-	$90^\circ \pm 0.01$ mrad
XY軸上の変位検出とZ軸上の変位検出における検出位置の距離		-	35 mm	0 mm

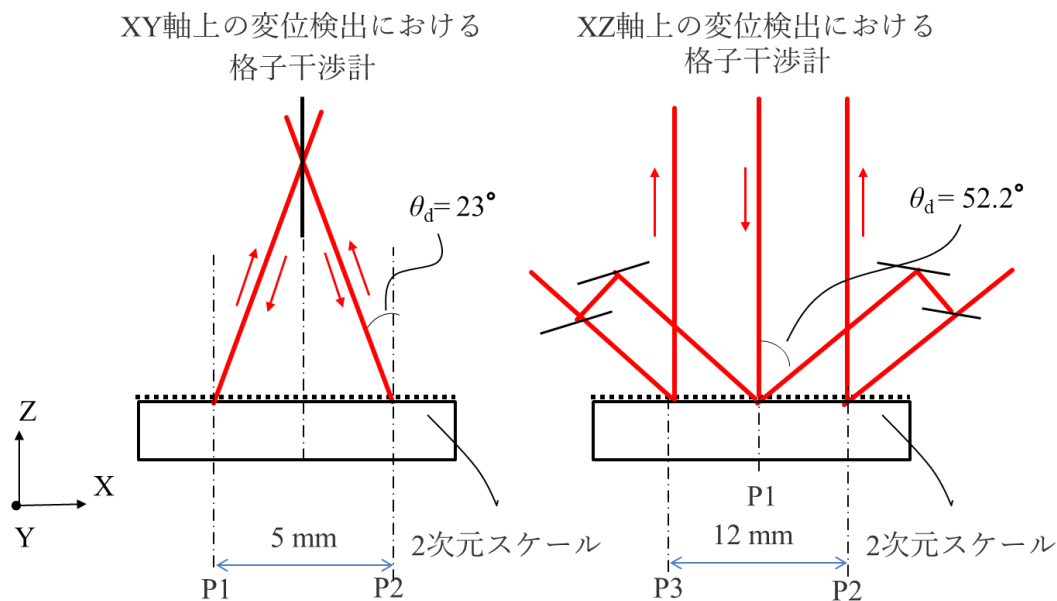


Fig. 5-2-1 格子干渉計の2次元スケール上のビーム入射位置

最後に XY 軸上の変位検出と Z 軸上の変位検出における 2 次元スケール上の検出位置の距離に関して、XY 軸上の変位検出における格子干渉計と Z 軸上の変位検出における格子干渉計の組み合わせでは、原理の異なる格子干渉計を並べて配置する都合上、今回の実装では XY 軸上の変位検出と Z 軸上の変位検出における検出位置が 35 mm 離れてしまうことになる。制御対象が比較的大きなステージ制御では、現状の構成でも優位性を発揮できるが、数ミリメートル範囲で 6 自由度の制御を行うような小型微動ステージ制御への展開を考えると、搭載が困難であると考えられ、小型化により離れた検出位置を 1 点に近づけるという課題が残る。

以上の考察から、今回実現した 3 次元エンコーダは、XY 軸上の変位検出における格子干渉計と Z 軸上の変位検出における格子干渉計の組み合わせで、本研究の目的を十分に達成しており、小型化することで半導体露光装置だけではなく半導体検査装置や自由曲面金型加工機などの、幅広い高精度ステージの位置決め用途^[59-67]で優位性を示すことができることが言える。

5-3 結言

3 次元エンコーダを実現する方法として、XY 軸上の変位検出における格子干渉計と Z 軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせる方法と、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計を YZ 軸上にも適用する方法を提案し、それぞれの基本性能について検証結果をもとに考察した。結果は、XY 軸上の変位検出における格子干渉計と Z 軸上の変位検出にお

る格子干渉計の組み合わせによる構成の実現性が高く、高精度高分解能と高い安定性を両立した XYZ 軸上の変位検出が可能であることが分かった。

一方、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計を YZ 軸上にも適用した方法は、格子干渉計の光路の往復路における 2 次元スケール上のビームの入射位置を近づければ、ステージの姿勢変化によるリニアリティの誤差発生も軽減される。また XYZ 軸上の検出位置が一致する原理であることから、数ミリの範囲で 6 自由度制御を行うような微動ステージなどの、狭い空間の変位情報を取得する場面では、構造的な優位性を発揮する。さらに 2 次元スケールが Z 軸上を移動する場合において、2 次元スケールへのビームの入射位置が動かないという他の原理に無い優位性を持つ。例えば 2 次元スケールの全面の精度をマップ状に補正する場合、Z 軸上の変位があってもマップ状の補正值が変わることがなく、2 次元的な補正情報で済むことから、今回課題としてあがった格子干渉計の信号周期と回折角の最適化による 2 次元スケールのたわみの影響の軽減と、格子干渉計の光路の往復路における 2 次元スケール上のビームの入射位置の近接化による姿勢誤差軽減によって、実現性が非常に高くなると考える。

今回 3 次元計測の高精度化に向けて、安定した変位検出を実現する 3 次元エンコーダの提案と開発を行い、特に従来技術の課題であった Z 軸上の変位による検出光路内の互いに干渉し合うビームの光路長差を極めて小さくした格子干渉計の効果を解析と検証によって確認できた。今後さらなる取り組みとしては、小型化と Z 軸上の変位検出における正規直交性の改善が、課題として挙げられる。格子干渉計の小型化によって、検出位置を 1 点に近づけることは誤差軽減の観点から言うまでもなく、格子干渉計内の全体の光路を短くする試みも安定性の向上という観点からも改善を継続させなければならない。一方、格子干渉計に依存する XY 平面に対する Z 軸上の変位検出の正規直交性は、2 次元スケールに依存する XY 軸上の正規直交性に比べ 1 桁以上悪い。半導体の高精細化によって近年のステージ制御は、XYZ 軸上の制御に加え X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの姿勢制御が必須となっている。この回転の動作があつたとしても Z 軸上の検出精度に影響しない補正光学系の提案も、今後必要になると考えられ、今回開発した原理に付加していきたい。

第6章 結論

第1章では、回折格子からなる2次元スケールを用いた3次元エンコーダによるステージ制御において、従来の技術では、Z軸上の変位によって検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差 L_Z を基本的に発生させないという観点で検討されておらず、Z軸上の変位検出において、安定かつ高精度な変位検出に課題があった。したがって検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差をキャンセルできる格子干渉計の特徴を応用し、Z軸上の変位検出において検出光路の光路長が変化しない原理の提案と解析、そして格子干渉計の開発を行うことで、3次元エンコーダの実現させることを目的とした。

また本論文の構成は、既存のXY軸上の変位検出における格子干渉計と新たに開発したZ軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせた方法と、新たに開発したXZ軸上の変位検出における格子干渉計をYZ軸上にも適用させた方法の2種類の3次元エンコーダの実現性の検討を行い、それぞれの方法がどのような特徴を持ち、従来方法に対する優位性と課題について、検証データをもとに結論を出すこととした。

第2章で既存のXY軸上の変位検出における格子干渉計について、マグネスケール社製のレーザスケールと2次元スケールを用いて格子干渉計の安定性、内挿精度、2次元スケールの精度、リニアリティの確認を行い、1hで平均値 ± 0.2 nmの安定性と15 pm以下の内挿精度、1 mmあたり0.2 nmのリニアリティを確認した。一方、2次元スケールの正規直交性については、精度確認結果から $90^\circ \pm 0.001$ mradであることを確認し、将来的に2次元スケールを用いた直交度計測方法として産業機器の高精度化に貢献できることを確信した。

第3章ではZ軸上の変位検出における格子干渉計を新たに開発し、実装させることで性能を確認した。結果は、8.4 pmの検出分解能と、8 mmのZ軸検出範囲を実現と、1hで平均値 ± 0.7 nmの安定性と、0.5 mmあたり平均値 ± 1.6 nmのリニアリティが得られていることを確認した。

第4章では、新規にXZ軸上の変位検出における格子干渉計を提案し、実装させることで性能を確認した結果、X軸上の変位検出で30.5 pm、Z軸上の変位検出で30.5 pmの検出分解能と、1 mmのZ軸上の変位検出範囲と、X軸上の変位検出で平均値 ± 3.5 nm、Z軸上の変位検出で平均値 ± 6.5 nmのリニアリティと、X軸上の変位検出で平均値 ± 0.3 nm、Z軸上の変位検出で平均値 ± 0.7 nmの1hの安定性と、 $90^\circ \pm 0.01$ mradのXY平面に対するZ軸上の変位検出における正規直交性を確認した。

第5章では、既存のXY軸上の変位検出における格子干渉計と開発したZ軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせた3次元エンコーダと、XZ軸上の変位検出における格子干渉計をYZ軸上に適用した3次元エンコーダについて、これまでの検証結果をもとに基本性能を比較し考察した結果、XY軸上の変位検出における格子干渉計とZ軸上の変位検出における格子干渉計を組み合わせた構成の実現性が高く、高分解能と高い安定性を両立し

た XYZ 軸上の変位検出が可能になることが分かった。一方、XZ 軸上の変位検出における格子干渉計を YZ 軸上にも適用した方法は、格子干渉計の光路の往復路において、2次元スケール上の入射位置を近づけることで、ステージの姿勢変化による誤差発生を軽減させリニアリティを改善すれば、実現性は非常に高くなり、2次元スケール上で XYZ 軸上の検出位置が一致している構造上、数ミリの範囲で 6 自由度制御を行うような微動ステージなどの、狭い空間の変位情報を取得る場面で、優位性を発揮するという結論に達した。

本研究においては、3次元エンコーダの高精度化に向けて、安定した Z 軸上の変位検出を実現する格子干渉計の提案と開発が特徴となっている。Z 軸上の変位検出における格子干渉計として、本研究で新たに提案した検出光路内の互いに干渉するビームの光路長差を発生させない原理は、大気中の温度や気圧、湿度の変化に対して、その影響を抑制させるだけではなく、温度変化による光源の波長変化が大きい安価な半導体レーザでも使用でき、さらに可干渉性の低い光源を使用しても広い計測範囲が得られるため、幅広い分野に応用できる。従来技術で多く利用されている He-Ne レーザを光源とした光波干渉計と比較して、計測条件を温度変化 1°C、気圧変化 30 hPa、湿度変化 10%、計測範囲 1 mm としたとき、本格子干渉計は 1/8 の安定性を安価な半導体レーザで実現できることになり、また、計測範囲が 2 倍に広がると、光波干渉計との安定性の差は 1/16 に拡大し優位性がさらに増す。この原理提案方法を 3 次元計測の分野に導入することにより、特に進歩が著しい半導体製造装置において重要視されるステージのピッチ、ロール、ヨーの姿勢制御の精度を上げ、露光や検査の精度を上げ微細化を促す。これによって将来的に個人用デバイス、サーバ、人工知能、次世代移動通信、自動運転、パワーデバイスによるクリーンエネルギーといった半導体を用いたアプリケーションの発展に寄与すると考える。

付録

2次元スケールの直交度に関する確認

2次元スケールの直交度は、Fig. 2-4-3-1 に示した精度確認システムで2次元スケールの精度測定を行い、その精度結果から $90^\circ \pm 0.26''$ と求められた。この精度確認システムの直交度の不確かさは Table A-1 にまとめたように $0.05''$ と計算される。その不確かさは、調整に用いた基準 90° ミラーの精度に依存する。

Table A-1 精度確認システムにおける直交度の計測誤差

誤差項目	評価タイプ	分布	標準不確かさ
調整において X 軸上の光波干渉計のミラーに加算される誤差	A	正規分布	0.01''
調整において Y 軸上の光波干渉計のミラーに加算される誤差	A	正規分布	0.01''
調整に用いた基準 90° ミラーの精度	B	一様分布	0.05''
X 軸上の光波干渉計の安定性	A	正規分布	0.01''
Y 軸上の光波干渉計の安定性	A	正規分布	0.003''
合成	0.05'' (0.0003 mrad)		

そこで別の方法を用いて2次元スケールの直交度を再検証した。計測原理としては、精度確認システムのステージ上で2次元スケールを 0° 配置と 90° 配置の計測を行い、それぞれの \sin 誤差を計測し比較することで算出する格子回転法^[68]を採用した。この方法は、安定性の高い2次元スケールのみを回転させ、その他の配置条件を変化させないため、短時間な計測が可能であり、メカニカルなドリフトだけではなく不安定な光波干渉計のドリフトの影響も小さくできるメリットがある。一方、デメリットとしては、任意の1ラインでしか証明できないことであり、今回は2次元スケールの中央付近の1ラインで確認をした。

計測手順は、Fig. A-1 に示すように、まず XY ステージ上に2次元スケールを左図の配置で固定し、X 軸上にステージを動かしたときの Y 軸上の変位検出における格子干渉計の変位を計測し θ_{X0° を求める。続いて Y 軸上にステージを動かしたときの X 軸上の変位検出における格子干渉計の変位を計測し θ_{Y0° を求める。次に右図のように2次元スケールを 90° 回転させた配置で固定し、同様に X 軸上にステージを動かしたときの Y 軸上の変位検出における格子干渉計の変位を計測し、 θ_{X90° を求め、続いて Y 軸上にステージを動かしたときの X 軸上の変位検出における格子干渉計の変位を計測し θ_{Y90° を求める。

この計測結果には、2次元スケールの直交度と、精度確認システムの XY ステージの直交度が含まれているが、 $\{(\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}) - (\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ})\} / 2$ は2次元スケールの直交度、 $\{(\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}) + (\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ})\} / 2$ は XY ステージの直交度として分離できる。つまり 0° の計測結

果と 90°の計測結果の差は XY ステージの直交度がキャンセルされ、0°の計測結果と 90°の計測結果の和は 2次元スケールの直交度の符号が反転するため、2次元スケールの直交度がキャンセルされる。計測結果を **Table A-2** に示すが、本計測において 2次元スケールの直交度は、 $\{(\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}) - (\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ})\} / 2 = 0.01''$ となり、 $90^\circ + 0.01''$ であることが確認できた。また精度確認システムの XY ステージの直交度は、 $\{(\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}) + (\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ})\} / 2 = 39.24''$ となり、 $90^\circ + 39.24''$ だった。なお計測誤差の観点から角度 (") の有効桁は、小数点 2 桁とした。

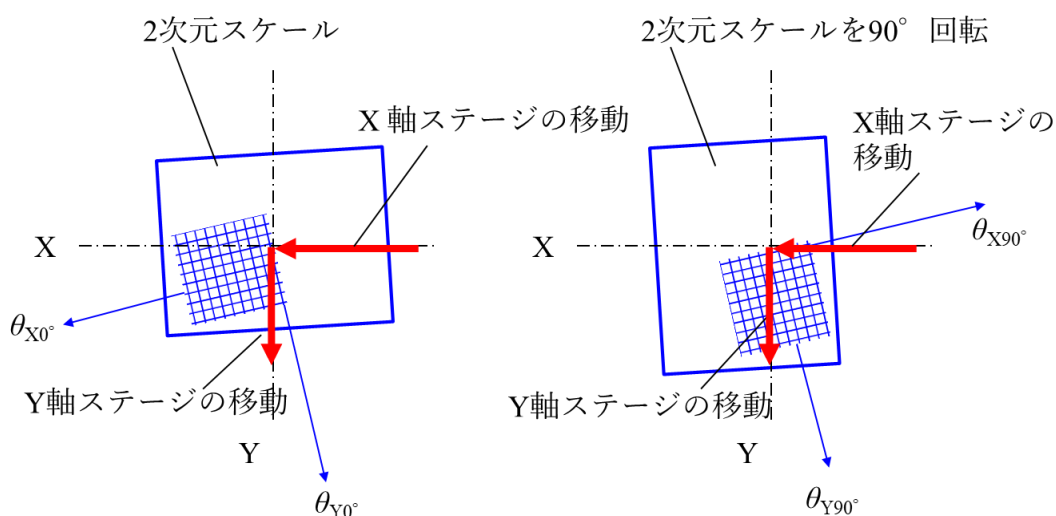


Fig. A-1 格子回転法による 2次元スケールの直交度の確認手順

Table A-2 2次元スケールの 0°配置と 90°配置の sin 誤差計測結果

	θ_{X0°	θ_{Y0°	$\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}$	θ_{X90°	θ_{Y90°	$\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ}$
1 回目	0.239	38.984	39.22	- 7.663	46.903	39.24
2 回目	0.166	39.067	39.23	- 5.353	44.616	39.26
3 回目	0.160	39.065	39.23	- 5.041	44.297	39.26
平均			39.23			39.25

(単位: ")

次に今回直交度の確認で採用した回転格子法の妥当性を検証するためにスコヤを用いて同様の計測を行い、精度確認システムの XY ステージの直交度が、2次元スケールによって計測された結果と一致するかを確認した。計測手順として **Fig. A-2** に示すように XY ステージ上にスコヤを置き、精度確認システムの XY ステージを X 軸上と Y 軸上に沿って動かし、電気マイクロを使用してスコヤの直交し合う面を計測し θ_{X0° と θ_{Y0° を求めた。次にスコヤを

XY ステージの上で 90°回転させ、同様に XY ステージを X 軸上と Y 軸上に沿って動かし、電気マイクロを使用してスコヤの直交し合う面を計測し θ_{X90° と θ_{Y90° を求めた。スコヤの直交度は、事前に東京精密製の 3 次元計測機で計測し、 $-1''$ であること確認した。本計測もスコヤの直交度と XY ステージの直交度に分離できるが、角度の有効桁は小数点 2 桁とし、計測結果を **Table A-3** にまとめる。この結果からスコヤの直交度は、 $\{(\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}) - (\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ})\} / 2 = -0.83''$ であった。また XY ステージ直交度は、 $\{(\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}) + (\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ})\} / 2 = 39.35''$ であった。

以上の計測結果から、スコヤを回転させた XY ステージの直交度の計測結果が、2 次元スケールを用いた XY ステージの直交度の計測結果と、小数点 1 桁の範囲で一致することと、スコヤの直交度の計測結果が、3 次元計測機の結果と一致することで、回転格子法における直交度の確認は、妥当性があると言える。

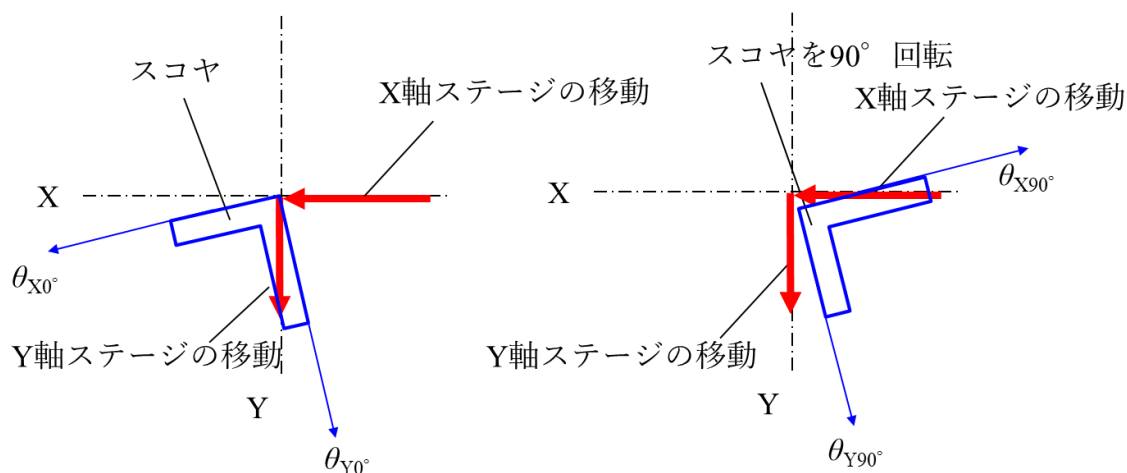


Fig. A-2 スコヤを用いた XY ステージ直交度の確認

Table A-3 スコヤ 0°配置と 90°配置の sin 誤差計測結果

	θ_{X0°	θ_{Y0°	$\theta_{X0^\circ} + \theta_{Y0^\circ}$	θ_{X90°	θ_{Y90°	$\theta_{X90^\circ} + \theta_{Y90^\circ}$
1 回目	41.93	- 2.41	39.52	477	- 2.75	38.62
2 回目	42.95	- 2.75	40.20	40.01	- 1.89	38.12
3 回目	42.22	- 1.38	40.84	43.29	- 4.47	38.82
平均			40.18			38.52

(単位: ")

謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻に在学中、同研究科の青山英樹教授のご指導のもとで行われたものであり、同教授より賜ったご指導とご鞭撻に厚く御礼申し上げます。またカリフォルニア大学バークレイ校、デービス校の山崎和雄教授には、国際共同指導者として本研究遂行の詳細にわたりご助言を賜り、心から厚く御礼申し上げます。

ご多忙の中の貴重な時間を割かれて本論文をご査読いただき、有益なご助言とご指導を数多く賜りました、慶應義塾大学大学院理工学研究科 柿沼康弘教授、田口良広教授、閻紀旺教授に厚くお礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、多大なご支援を頂きました株式会社マグネスケール 藤森徹社長に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、材料の提供、試作、計測など、細部にわたりご支援を頂きました、株式会社マグネスケール 谷口専務取締役、新谷係長、中村係長、見寺研究員以下、多くの皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Gordon Earle Moore, “Cramming more components onto integrated circuits”, *Electronics*, 8, pp. 114, (1965).
- [2] Martin van den brink, “Industry Roadmap and Technology Strategy”, ASML SMALL TALK , URL; <https://www.asml.com>, pp. 1-26, (2018).
- [3] Jan van Schoot, Jos Benschop, Sjoerd Lok, Eelco van Setten, Ruben Maas, Kars Troost, Jo Finders, Paul Graeupner, “High-NA EUV Lithography Exposure Tool for EUV roadmap extension”, EUV-FEL Workshop, URL; <https://conference-indico.kek.jp>, pp. 1-44, (2021).
- [4] 石内秀美, “ITRS 2005 Edition 国際半導体技術ロードマップ”, *JEITA Review*, pp. 22-25, (2006).
- [5] 中馬宏之, “わが国半導体露光装置産業が直面する複雑性と組織限界”, *光学*, 34 巻, 8 号, pp. 388-395, (2005).
- [6] Hikida Yujiro, Hayakawa Akira, Teshima Yoshihiro, Dosho Tomonori, Kasai Noriaki, Yoda Yasushi, Masaki Kazuo, Shibasaki Yuichi, “Enhancement of ArF immersion scanner system for advanced device node manufacturing”, *SPIE Advanced Lithography*, SPIE vol. 10587, (2018).
- [7] Ito Takashi, Okazaki Shinji, “Pushing the limits of Lithography”, *NATURE*, Vol. 406, pp. 1027-1028, (2000).
- [8] 溝口計, “半導体露光用 EUV 光源開発の進展と最新動向”, *ギガフォトン株式会社ホームページ* URL; <http://www.gigaphoton.com/>, pp. 1-6, (2012).
- [9] 姜帥現, 井上壮一, “半導体デバイスの微細化を実現する EUV リソグラフィ技術”, *東芝レビュー*, Vol. 67, No. 4, pp. 36-40, (2012).
- [10] 村上勝彦, “使用波長による光学系の計測評価”, *精密工学会誌*, Vol. 64, No. 7, pp. 987-990, (1998).
- [11] 溝口計, 斎藤隆志, 伊藤仙聡, 山崎卓, “半導体製造用短波長光源 エキシマレーザーから LPP-EUV 光源への挑戦”, *KOMATUS TECHNICAL REPORT*, Vol. 62, No. 169, PP. 27-37, (2016).
- [12] 岡崎信次, “EUV 露光技術の開発と放射光の役割”, *放射光*, Vol. 18, No. 3, pp. 128-135, (2005).
- [13] 廣田義人, “半導体露光装置ステッパーの開発 普及とその要因”, *技術と文明*, 12 巻, 2 号, pp. 27-52, (2001).
- [14] 村上勝彦, “縮小露光光学系・照明光学系の設計”, *精密工学会誌*, Vol. 64, No. 7, pp. 991-995, (1998).
- [15] Celine Lapeyre, Sebastien Barnola, Isabelle Servin, Stephanie Gaugiran, Vincent Salvetat, Magome Nobutaka, Andrew J. Hazelton, Martin McCallum, “Impact of CD and overlay errors

- on double-patterning processes”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 7274, (2009).
- [16] 東木達彦, 大西廉伸, “半導体リソグラフィ技術の動向と東芝の取組み”, 東芝レビュー, Vol. 67, No. 4, pp. 2-6, (2012).
- [17] Prasad Dasari, Jie Li, Jiangtao Hu, Nigel Smith, Oleg Kritsun, “Diffraction Based Overlay Metrology for Double Patterning Technologies”, Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications, pp. 433-454, (2011)
- [18] 小谷敏也, 間下浩充, 宇野太賀, “半導体デバイスの微細化を支える OPC 技術と DFM 技術”, 東芝レビュー, Vol. 67, No. 4, pp. 11-15, (2012).
- [19] 川口幸男, “次世代リソグラフィ技術に応用するブロックコポリマーの重合技術”, Readout, No. 47, pp. 28-31, (2016).
- [20] Azuma Tsukasa, Seino Yuriko, Sato Hironobu, Kasahara Yusuke, Kobayashi Katsutoshi, Kubota Hitoshi, Kanai Hideki, Kodera Katsuyoshi, Kihara Naoko, Kawamonzen Yoshiaki, Minegishi Shinya, Miyagi Ken, Yamano Hitoshi, Tobana Toshikatsu, Shiraishi Masayuki, Nomura Satoshi, “Fabrication of Sub-10 nm Metal Wire Circuits using Directed Self-Assembly of Block Copolymers”, Journal of Photopolymer Science and Technology, Vol. 29, No. 5, pp. 647-652, (2016).
- [21] 岡崎信次, “光リソグラフィ技術の限界と極紫外線リソグラフィ技術への期待”, 光学, 41 巻, 3 号, pp. 116-124, (2012).
- [22] 石内秀美, “2008 年度 STRJ 年度報告書”, 半導体技術ロードマップ専門委員会, 第 6 章, pp. 1-20, (2008).
- [23] 後藤太邦, 湯浅匡夫, “半導体露光装置の制御技術”, 計測と制御, 第 52 巻, 第 5 号, pp. 425-429, (2013).
- [24] Uehara Yusaku, Ishikawa Jun, Kohno Hirotaka, Tanaka Eiichiro, Ohba Masanori, Shibazaki Yuichi, “Immersion and dry ArF scanners enabling 22 nm HP production and beyond”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 8326, (2012).
- [25] 稲秀樹, “リソグラフィ用半導体露光装置におけるウェハアライメント計測の高精度化の研究”, 電気通信大学大学院博士論文, pp. 2-22, (2007).
- [26] 赤津利雄, “精密位置決め用変位センサーの現状と問題点”, 光学, 22 巻 6 号, pp.329-334, (1993).
- [27] Ralf K Heilmann, Carl G Chen, Paul T Konkola, Mark L Schattenburg, “Dimensional metrology for nanometre-scale science and engineering: towards sub-nanometre accurate encoders”, Nanotechnology, 5, pp. 504-511, (2004).
- [28] Shibazaki Yuichi, Kohno Hirotaka, Hamatani Masato, “An innovative platform for high-throughput high-accuracy lithography using a single wafer stage”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 7274, (2009).
- [29] 柴崎祐一, 特許, 世界知的所有権機関国際事務局, WO 2008 / 026739, (2008).

- [30] ASML, 特許, 日本特許庁, 特開2007-318119, (2007).
- [31] 柴崎祐一, “露光装置”, 半導体微細パターンニング, 第I編, 第1章, pp. 11-20, (2017).
- [32] Jan Mulkens, Michael Hanna, Hannah Wei, Vidya Vaenkatesan, Henry Megens, Daan Slotboom, “Overlay and edge placement control strategies for 7nm node using EUV and ArF lithography”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 9422, (2015).
- [33] 村上勝彦, 岡崎信次, “EUV リソグラフィと露光装置”, J. Plasma Fusion Res., Vol. 79, No. 3, pp. 221-225, (2003)
- [34] Skip Miller, “Holistic View of Lithography for Double Patterning”, Sokudo Litho Breakfast Forum 2009, URL; <https://www.screen.co.jp/>, pp. 7, (2009).
- [35] 松山知行, “液浸リソグラフィにおける結像特性の考察”, 光学, 34 卷, 3 号, pp. 151-153, (2005).
- [36] Mark van de Kerkhof, Hans Jasper, Leon Levasier, Rudy Peeters, Roderik van Es, Jan-Willem Bosker, Alexander Zdravkov, Egbert Lenderink, Fabrizio Evangelista, Par Broman, Bartosz Bilski, Thorsten Last, “Enabling sub-10nm node lithography, presenting the NXE: 3400B EUV scanner”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 10143, (2017).
- [37] Bo Jou Lu, E T Anson Zeng, Aroma Tseng, Steven Wu, Bill Lin, Chun Chi Yu, “Line Width Roughness (LWR) Performance of Novel Surface Conditioner Solution for Immersion Lithography”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 6923, (2008).
- [38] Rudy Peeters, Sjoerd Lok, Erwin van Alphen, Noreen Harned, Peter Kuerz, Martin Lowisch, Henk Meijer, David Ockwell, Eelco van Setten, Guido Schiffelers, Jan-Willen van der Horst, Judon Stoeldraijer, Robert Kazinczi, Richard Droste, Hans Meiling, Ron Kool, “ASML’s NXE platform performance and volume introduction”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 8679, (2013).
- [39] Timothy A. Brunner, Xuemei Chen, Allen Gabor, Craig Higgins, Lei Sun, Chris A. Mack, “Line-Edge Roughness performance targets for EUV Lithography”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 10143, (2017).
- [40] Hoyoung Kang, “Novel assist feature design to improve depth of focus in low k1 EUV Lithography”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 17520, (2009).
- [41] John E. Bjorkholm, “EUV Lithography The Successor to Optical Lithography?”, Intel Technology Journal, Q3, pp. 1-8, (1998)
- [42] C. Zahlten, P. Graupner, J. van Schoot, P. Kurz, J. Stoeldraijer, W. Kaiser, “High-NA EUV lithography pushing the limits”, SPIE Advanced Lithography, SPIE vol. 11177, (2019).
- [43] 篠原昭, “モアレ縞の幾何学”, 繊維工学, Vol. 37, No. 6, (1984).
- [44] 谷口佳代子, 山本英生, “ホログラムスケールとその応用”, 光技術コンタクト, Vol. 30, No.6, pp. 311-318, (1992).
- [45] Andrew Yacoot, Nigel Cross, “Measurement of picometer non-linearity in an optical grating

- encoder using x-ray interferometry”, *Meas. Sci. Technol.*, 14, pp. 148-152, (2003).
- [46] 鈴木紀和, “高分解能センサの現状”, *精密工学会誌*, Vol. 67, No. 7, (2001).
- [47] 鍋島信雄, 特許, 日本特許庁, 特開平 9-68407, (1995).
- [48] 高偉, 特許, 日本特許庁, 特開2007-304039, (2007)
- [49] Gao Wei, Kimura Akihide, “A Three-axis Displacement Sensor with Nanometric Resolution”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 56, pp. 529-532, (2007).
- [50] ヴォルフガング・ホルツアプフェル, 特許, 日本特許庁, 特開2007-78687, (2007).
- [51] 田宮英明, 特許, 日本特許庁, 特開 2007-218833, (2007).
- [52] 藤森徹, “NC 工作機械の高精度運動制御のためのリニアスケールシステムに関する研究”, 慶應義塾大学大学院博士論文, pp. 72-74, (2014).
- [53] 田宮英明, 特許, 日本特許庁, 特開2013-152205, (2013).
- [54] Herwig Kogelnik, “Coupled wave Theory for Thick Hologram Grating”, *The Bell System Technical Journal*, Vol.48, No. 9, pp. 2909-2947, (1969).
- [55] 中村勇輔, 見寺祥幸, 田宮英明, 特許, 日本特許庁, 特開2016-14600, (2016).
- [56] 田宮英明, 見寺祥幸, 野田航生, 特許, 日本特許庁, 出願2018-208660, (2018).
- [57] 新谷真之: “自己校正型 2次元スケール技術”, *精密工学会誌*, Vol. 82, No. 9, pp. 788-791, (2016).
- [58] 田宮英明, 新谷真之, “自己校正型 2次元スケールによるナノメートルレベルのステージ校正”, *光技術コンタクト*, Vol. 54, No. 10, pp. 16-21, (2016).
- [59] バラン アビブ, 特許, 日本特許庁, 特表 2017-508172, (2017).
- [60] 畠山雅規, 村上武司, 渡辺賢治, 狩俣努, 寺尾健二, “EUV マスク欠陥検査に用いる新写像投影(PEM)式電子光学系の製作”, *エバラ時報*, No. 241, pp. 9-14, (2013).
- [61] 磯村育直, 土屋英雄, 菊入信孝, “先端半導体デバイスの製造を支えるマスク欠陥検査装置技術”, *東芝レビュー*, Vol. 67, No. 4, pp. 28-31, (2012).
- [62] 熊谷和博, “ナノ材用計測のための走査電子顕微鏡法および関連標準物質に関する調査研究”, *産総研計量標準報告*, Vol. 9, No. 2, pp. 293-309, (2015).
- [63] 中杉哲郎, 河野拓也, 米田郁男, “光ナノインプリントリソグラフィ技術”, *東芝レビュー*, Vol. 67, No. 4, PP. 41-43, (2012).
- [64] Fukuhara Kazuya, Suzuki Masato, Mitsuyasu Masaki, Kono Takuya, Nakasugi Tetsuro, Yonghyun Lim, Wooyung Jung, “Overlay control for nanoimprint lithography, *Proc. of SPIE*, SPIE vol. 10144, (2017).
- [65] 松寺克樹, 河崎一茂, “TSV 技術を用いた世界初の 16 段積層 NAND 型フラッシュメモリパッケージ”, *東芝レビュー*, Vol. 71, No. 6, PP. 20-23, (2016).
- [66] 廣瀬智博, “光学部品用金型加工向け超精密加工機の高速度・高精度化に関する研究”, 金沢工業大学大学院博士論文, pp. 36-47, (2016).
- [67] 竹内芳美, 川北晋一郎, 沢田潔, 佐田登志夫, “超精密フライス加工の研究”, *日本機械*

学会論文集(C編), 59巻, 566号, pp. 287-292, (1993).

- [68] 茨木創一, 後藤渉, 松原厚, 越智玉樹, 浜村実, “交差格子スケールの自己較正法”, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 8, pp. 1032-1037, (2006).

関連論文

1. 定期刊行誌掲載論文 (主論文に関連する論文)

- (1) Tamiya Hideaki, Taniguchi Kayoko, Yamazaki Kazuo, Aoyama Hideki, “Detection principle and verification of non-contact displacement meter with pico-meter resolution”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 12, No. 5, pp. 1-7, (2018).
- (2) Tamiya Hideaki, Mitera Yoshiyuki, Taniguchi Kayoko, Yamazaki Kazuo, Aoyama Hideki, “Development of three-dimensional encoder for highly accurate positioning”, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 85, No.10, pp. 891-895, (2019).

2. 国際会議論文 (査読付きの Full-length papers)

- (1) Tamiya Hideaki*, Taniguchi Kayoko, Yamazaki Kazuo, Aoyama Hideki, “Detection Principle and Verification of Non-contact Displacement Meter with Pico-meter Resolution”, Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century, (LEM21, Hiroshima, Japan), (4pages), (2017).
- (2) Tamiya Hideaki*, Mitera Yoshiyuki, Taniguchi Kayoko, Yamazaki Kazuo, Aoyama Hideki, “Basic Development of Three Dimensional Encoder for Highly-accurate Positioning”, 17th International Conference on Precision Engineering, (ICPE2018, Kamakura, Japan), (5pages), (2018).

3. 国内学会発表

- (1) 田宮英明* “pm 分解能非接触変位計”, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (精密工学会, 東京, 2012), pp. 1013-1014.
- (2) 田宮英明* “pm 分解能非接触変位計 第 2 報”, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (精密工学会, 福岡, 2012), pp. 625-626.
- (3) 田宮英明*, 見寺祥幸, 谷口佳代子, 青山英樹, 山崎和雄 “高精度位置決めのための三次元エンコーダの基礎開発”, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (精密工学会, 東京, 2019), pp. 795-796.

4. その他

- (1) 田宮英明, 「変位検出装置」 特開 2013-152205.
- (2) 田宮英明, 「変位検出装置」 特開 2015-212682.
- (3) 田宮英明, 見寺祥幸, 野田航生, 「変位検出装置」 出願 2018-208660.

