

平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		きよの さとし				所属研究機関・部局・職		東北大学・大学院工学研究科・教授																																											
研究代表者氏名		清野 慧																																																	
研究課題名	和文	次世代 3 軸精密ステージ用のサーフェスエンコーダの開発																																																	
	英文	Development of a surface encoder for next generation three-axis precision stages																																																	
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計																																												
16年度以降は内約額 金額単位：千円		31,500	17,700	16,200	10,500	7,600	83,500																																												
研究組織（研究代表者及び研究分担者）																																																			
氏名		所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担（研究実施計画に対する分担事項）																																													
清野 慧		東北大学・大学院工学研究科・教授		ナノ計測・光応用計測		研究統括、マルチスポット光学系の設計・製作、短ピッチ角度格子製作																																													
高 偉		東北大学・大学院工学研究科・助教授		精密計測・加工計測		サーフェスモータ移動子の設計・製作、位置制御システム構築																																													
山中 将		東北大学・大学院工学研究科・助教授		機械要素・機械工作		位置制御システム構築、短ピッチ角度格子製作																																													
清水 浩貴		東北大学・大学院工学研究科・助手		精密計測・光応用計測		マルチスポット光学系の設計・製作、角度格子波長間内挿実験																																													
青木 純 (H16年より参加)		東北大学・大学院工学研究科・助手		精密計測・加工計測		位置検出システムの構築、サーフェスモータ駆動部の開発																																													
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）																																																			
<p>「高精度」と「高速」を同時に達成し、面内回転自由度を付与できるものとして、サーフェスモータに次世代精密ステージとしての期待が集まっている。</p> <p>サーフェスモータにとって、移動子の重量は、モータ用の永久磁石列とウェーハやレチクルなどの搭載物とそれらを保持する台の重量を加えたものとなる。しかし精密なステージを求めると、位置検出用の干渉計の目標となる複数の直定規がサーフェスモータの移動子にとっては最大の重量となり、さらに位置検出系そのものがステージシステムのコンパクト性を損なう。また、干渉計を用いる限り、微小な姿勢誤差を超える回転θの自由度を活かす途はなくなる。</p> <p>このように、種々の点で次世代精密ステージとしての期待が大きいサーフェスモータであるが、その性能を活かす上での最大の障害はそれに適したエンコーダの不在にある。そこで本研究は、2次元の角度格子と角度センサの組み合わせで構成するサーフェスエンコーダを提案し、それをサーフェスモータに組み込む形で試作し、その実用性を実証することを目的にする。具体的には、プロトタイプを試作から得た知識を元にサーフェスエンコーダの性能を下表のように高め、サーフェスモータに組み込むことで次世代ステージの実用化への途を拓く。</p>																																																			
<p style="text-align: center;">表1 試作サーフェスエンコーダの目標性能</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>現有プロトタイプ</th> <th>改良版設定目標</th> <th>市販モータへ組み込み</th> <th>最終版設定目標</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>分解能</td> <td>nm</td> <td>200</td> <td>30</td> <td>20</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>スポット数</td> <td>点</td> <td>200</td> <td>2500</td> <td>2500</td> <td>5000</td> </tr> <tr> <td>格子ピッチ</td> <td>μm</td> <td>300</td> <td>150</td> <td>100</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>角度振幅</td> <td>秒</td> <td>400</td> <td>600</td> <td>600</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>格子面積</td> <td>mm</td> <td>40</td> <td>40</td> <td>100×100</td> <td>100×100</td> </tr> <tr> <td>位相変調法</td> <td></td> <td>単独スポット走査</td> <td>マルチスポット走査</td> <td>マルチスポット走査</td> <td>マルチスポット走査</td> </tr> </tbody> </table>												現有プロトタイプ	改良版設定目標	市販モータへ組み込み	最終版設定目標	分解能	nm	200	30	20	2	スポット数	点	200	2500	2500	5000	格子ピッチ	μm	300	150	100	30	角度振幅	秒	400	600	600	1000	格子面積	mm	40	40	100×100	100×100	位相変調法		単独スポット走査	マルチスポット走査	マルチスポット走査	マルチスポット走査
		現有プロトタイプ	改良版設定目標	市販モータへ組み込み	最終版設定目標																																														
分解能	nm	200	30	20	2																																														
スポット数	点	200	2500	2500	5000																																														
格子ピッチ	μm	300	150	100	30																																														
角度振幅	秒	400	600	600	1000																																														
格子面積	mm	40	40	100×100	100×100																																														
位相変調法		単独スポット走査	マルチスポット走査	マルチスポット走査	マルチスポット走査																																														

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

平成 14～15 年度の成果は以下の通りである。

光学系・センサ

- (1) グリッドパターンによるマルチスポットビーム生成のシミュレーションソフトウェアを開発し、最適なマルチビームを作るためのグリッドパターン設計条件を調べることを可能とした。
- (2) 光学シミュレーションを発展させ、角度格子の位置および姿勢変化をマルチスポットビームで検出する際の受光面での光強度分布とその挙動を求められるようにした。このシミュレーションにより、受光面に発生するマルチスポットが XY 変位、 $\theta_x\theta_y\theta_z$ の姿勢変化それぞれに対して特徴的な変化を示すことを明らかにした。これにより複数の受光部を適切な位置に配置した多素子型 PD1 つで 5 自由度の位置・姿勢を検出可能であることを示した。

角度格子

- (1) 角度格子の短ピッチ化と大口径化をすすめ、最終的にはピッチ 100 μm 、直径 150mm の角度格子を製作し、サーフェスマータに搭載した。さらに格子ピッチ 50 μm のものを試作し、さらなる短ピッチ化の可能性を示した。
- (2) 2次元 FFT を用いた誤差評価手法をベースに、角度格子の高精度化を行った。工具先端半径誤差を補正すること、外周部の制御点間隔の粗さから来る誤差を周速制御等により補正すること、さらに白色干渉顕微鏡と AFM を用いる手法でワーク中心と工具中心の心だしを正確に行い補正すること等により、角度格子形状の高精度化を行った。
- (3) 高速工具サーボを高精度化して制御誤差 5nm、カットオフ周波数 3kHz まで特性を向上させた。超精密旋盤に高速工具サーボを搭載して直径 55mm 長さ 150mm の円筒面全面に渡り波長 100 μm 振幅 100nm の 2次元角度格子形状を創成した。

検出システム

- (1) 角度センサを 2 本使用し、XY θ_z 3 自由度の位置・姿勢検出が可能なサーフェスエンコーダシステムを構築した。
- (2) 光を高速走査するスキヤニングタイプの 5 自由度位置検出システムの開発を予定より前倒しして実施した。この検出システムによりステージ停止時の 5 自由度位置・姿勢検出が提案手法により実現可能であることを示した。また同時に、移動制御にスキヤニングプローブを用いる場合の問題点を明らかにし、スキヤンの非等速性から生じる誤差を低減する計算式を提案した。
- (3) 1本の固定ビームプローブと1本のスキヤニングビームプローブを組みあわせ、走査プローブ停止時には3自由度の高速検出を可能とし、走査プローブ動作時には5自由度の検出を可能とする改良型5自由度サーフェスエンコーダを開発した。

サーフェスマータ

- (1) エアベアリングを使用した XY θ_z の 3 自由度ステージシステムを開発した。
- (2) 面内 3 自由度駆動が可能なステージシステム 2 種についてモータの推力解析を行った。また、X、Y 軸で非対称性を持つステージの各軸間の非干渉化を行うパラメータ同定を行った。

制御技術

- (1) サーフェスマータに 2 本の角度センサを使用するタイプのサーフェスエンコーダを搭載し、その出力から XY 面内の並進運動では 200nm、 θ_z の回転運動では 2.5 秒の分解能で制御できることを実証した。
- (2) 2つのマルチビーム角度センサを位置検出に用いる面内 3 自由度駆動が可能なステージシステムにおいてモータの推力解析を行った。ステージモデルを構築し制御器を設計、実装することで XY100nm、 θ_z 0.5 秒の駆動分解能と立ち上がり 30ms、オーバーシュート 0.6 μm 、整定時間 20ms での安定駆動を実現した。

特記事項（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。）

計画当初は光の挙動を光線光学的手法により解析していたが、マルチビームの間隔を短ピッチ化するに従い、PD 受光部に干渉による光線強度のピークが生ずるなど、光線光学では解析しきれない部分が生じてきた。そこで新たに波動光学をベースとしたモデル化と計算機シミュレーションによる解析を試みた。その結果、受光面の光強度分布には従来のオートコリメーション原理以外に位置・姿勢検出に有用な情報が含まれることを新たな知見として得た。そのモデルの概要と結果をまとめると以下のようになる。

角度格子にはその微細形状で入射点によって光の位相を変化させる位相格子のような働きがあるものとしてモデル化を行った。その結果、PD上では光線光学的な原理から生ずるピークの周囲に周期的な構造を持つ複数の強度ピークが立つことが分かった。ピークの生成は実験と比較しても良好な一致を見ており、モデル妥当性を確認した。

角度格子にXY方向の位置変化が生ずると、スポットの位置が変わらずに、XYそれぞれの方向でピークの高さ分布が変化する。

角度格子にピッチング θ_x 、ローリング θ_y が生じるとスポット全体がそれぞれX, Y方向に移動する。その移動量は幾何光学のオートコリメーション法と同様の結果を与える。

角度格子にヨーイング θ_z が生じるとピーク相互の間隔や位置関係は変わらず、全体が中央のピークを中心に回転する。

以上の波動光学的な解析結果をもとに、これらのピーク位置変化を検出可能な下図に示す多素子型PDを提案した。図中、黒線で囲まれた部分が受光部、赤の丸がビームスポットを表わす。

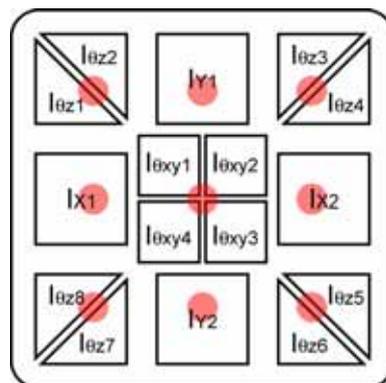


図 5自由度一括検出センサ用多素子型フォトダイオード

この多素子型PDでは

I_{X1}, I_{X2} の出力を用いてX方向の、 I_{Y1}, I_{Y2} の出力を用いてY方向の並進変位を求められる

$I_{\theta_{xy1}} \sim I_{\theta_{xy4}}$ の出力を用いてピッチング θ_x 、ローリング θ_y を求められる

$I_{\theta_{z1}} \sim I_{\theta_{z8}}$ の出力を用いてヨーイング θ_z 求められる

という特徴があり、単一のセンサで角度格子の位置・姿勢を一括して検出することが可能になる。この多素子型PDを当大学ベンチャービジネスラボラトリーで製作した。これを用いて基礎的な実験を行ったところ、新たに提案した原理が有効であることを確認した。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

- 1) 出島秀一,高 偉,矢内宏明,清野 慧 : サーフェスマータ駆動型多自由度ステージの位置決めの研究 (第2報) - ステージのダイナミック制御による微小位置決め実験 -, 精密工学会誌, 69, 3, (2003), 433-436.
- 2) Wei Gao, Takeshi Araki, Satoshi Kiyono, Yuichi Okazaki, Masashi Yamanaka : Precision Nano-fabrication and evaluation of a large area sinusoidal grid surface for a surface encoder, Precision Engineering, 27, 3, (2003), 289-298.
- 3) W. Gao, S. Dejima, Y. Shimizu, S. Kiyono : Precision Measurement of Two-Axis Positions and Tilt Motions Using a Surface Encoder, Annals of CIRP, 52/1, (2003), 435-438.
- 4) Wei Gao, Takeshi Araki and Satoshi Kiyono : Precision nanometrology of a large area microstructured metrology surface, Optics and Precision Engineering, 11-3, (2003), 223-226.
- 5) Yoji Watanabe, Wei Gao, Hiroki Shimizu and Satoshi Kiyono : Analysis of a Surface Encoder in Wave Optics, Key Engineering Materials, vol.257-258 (2004), pp.219-224.
- 6) Wei Gao, Shuichi Dejima, Hiroaki Yanai, Kei Katakura, Satoshi Kiyono and Yoshiyuki Tomita : A Surface Motor-Driven Planar Motion Stage Integrated with an XYθ_z Surface Encoder for Precision Positioning, Precision Engineering, in press.
- 7) Takeshi Araki, Wei Gao, Satoshi Kiyono, Masasyu Sudoh and Masami Mito : Generation of large-area microstructured surface by diamond turning with a fast tool servo, Proc. of ASPE Annual Meeting, St.Louis, (2002), 538-541.
- 8) Shuichi Dejima, Wei Gao, Satoshi Kiyono and Yoshiyuki Tomita : Multi-degree of freedom precision stage system integrated with a surface encoder, Proc. of 3rd euspen Int. Conf., Eindhoven, (2002), 59-62.
- 9) Shuichi DEJIMA, Wei GAO, Yuki SHIMIZU, Hiroki SHIMIZU and Satoshi KIYONO : A five degree-of-freedom surface encoder, Proc. of 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology, Daejeon, (2002), 102-103.
- 10) Hiroaki Yanai, Wei Gao and Satoshi Kiyono : A compact surface motor stage equipped with a surface encoder, Proc. of the 1st Korea-Japan conference on position technology, (2002), 23-24.
- 11) M. Tano, W. Gao, S. Kiyono, M. Mito : A Miniaturized Fast Tool Servo for Generating Micro-Structured Surface, euspen2003 Proceeding of euspen International Topical Conference, (2003), Vol.1, 73-76.
- 12) Shuichi DEJIMA : Precision Positioning of a Planar Motion Stage, Proc. of The 1st International Symposium on Mechanical Science Based on Nanotechnology, (2004), 115-121.
- 13) 出島秀一,高 偉,渡辺陽司,清水浩貴,清野 慧 : 5自由度サーフェスエンコーダの高速化に関する研究, 2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2003), 435.
- 14) 田野 誠,高 偉,水戸 正美,清野 慧 : 小型ファストツールサーボの制作と評価, 日本機械学会第4回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2002), 149-150.
- 15) 荒木 武,高 偉,清野 慧 : 大面積 3次元マイクロストラクチャの高精度創成と評価, 精密工学会秋季大会講演会論文集, (2002), 141.
- 16) 荒木 武,高 偉,清野 慧 : 大面積 3次元マイクロストラクチャの高精度創成と評価 - 形状データ離散化による誤差と工作機械運動誤差の補正 -, 精密工学会春季大会講演会論文集, (2003), 362.
- 17) 矢内宏明,高 偉,清野 慧 : XYθ_z 自由度サーフェスエンコーダに関する研究, 2003年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 625.
- 18) 出島秀一,高 偉,清野 慧,富田良幸 : サーフェスエンコーダを用いた平面モータの 5自由度精密位置決め, 2004年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2004), 1141-1142.
- 19) 矢内宏明,高 偉,清野 慧 : サーフェスマータ駆動型多自由度ステージの位置決めの研究 - 3自由度センサの設計 -, 精密工学会東北支部学術講演会 (2002年一関) 講演論文集, (2002), 13-14.
- 20) 出島秀一,高 偉,清野 慧 : サーフェスエンコーダによる位置・姿勢5自由度検出についての研究 検出誤差の低減, 日本機械学会東北支部第38期総会・講演会講演論文集, (2003), 136-137.

(受賞)

精密工学会沼田記念論文賞, マルチスポット光源を用いたサーフェスエンコーダの研究, (社)精密工学会, 2003. 3. 27.

精密工学会賞, Precision Nano-fabrication and evaluation of a large sinusoidal grid surface for a surface encoder, (社)精密工学会, 2004.3.17.