

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760315
 研究課題名（和文）非共振型アクチュエータを用いた次世代半導体製造用大型超精密ステージの実用化研究
 研究課題名（英文）Practical application research of large-scale ultra-precision stages driven by non-resonant type actuator for next-generation semiconductor manufacturing
 研究代表者
 橋本 誠司（HASHIMOTO SEIJI）
 群馬大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：30331987

研究成果の概要：本研究の目的は、次世代半導体製造用の電子線露光に特化した超精密ステージシステムの開発とその実用化である。この目的に対して、駆動周波数可変制御法に基づくスリップフリー駆動法を提案し、ステージの高精度化とともに高耐久化を達成した。また、可変忘却要素を用いた適応同定法により、経年変化や動特性変化に対して適応的に最適性能を保持する制御系を実現した。同時に、ステージを搭載した反力制御装置付き6自由度アクティブ除振システムを構築し、制御帯域のみを設計パラメータとする同定と制御の統合化設計法を提案し、その有効性を実験により検証した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,300,000	0	2,300,000
2007年度	800,000	0	800,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	180,000	3,880,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：超精密ステージ，非共振型超音波モータ，可変構造制御，適応同定，駆動反力制御，非線形摩擦，予測制御

1. 研究開始当初の背景

半導体製造技術は急速にその高度化が進められている。国際半導体技術ロードマップ ITRS2004 では 45 nm ノードまでは光源に ArF（波長 193 nm）を用いた液浸技術により達成され、それ以上微細なノードでは新技術が必要となり、ArF の対抗技術となる 13.5 nm 波長の極紫外線（EUV）が利用されることが発表された。

このような ITRS 達成の鍵は半導体露光装置であり、微細化の解法には光源の短波長化とともに精密ステージの高度な制御技術が

大きく寄与していた。また、次世代光源とされる電子線露光に関する研究も進んできており、各種技術が開発されていた。

このような背景のもと、次世代精密ステージには高耐久で速度ムラを極限まで除外した高速かつサブナノメータ分解能を持つアクチュエータが要求されている。そこで、研究代表者は、これまでに共同研究企業とともに次世代 EB 露光への応用を目的とした非共振型超音波アクチュエータを駆動源とする超精密ステージの制御システムを開発してきた。本ステージは、高精度、高トルク、小

型、低発熱、真空対応等の特長を有し、また、電磁力を用いないため磁気ノイズ特性に優れており、荷電粒子応用装置における動力源に最適である。反面、摩擦駆動方式であるため摩擦変化の影響が大きく、最終目標である1 nm以下の高速・高精度位置決めを実現させるためには摩擦補償が必要不可欠となる。

これに対し先行開発では、次世代駆動方式の連続軌跡追従を目的としたシステム同定法と特に摩擦問題に着目した制御法を確立し、その基盤となる制御法に関し3件の特許を申請済みであった。しかしながら、実用化にあたっての高耐久化技術やリアルタイム診断技術、大型ステージシステムへの導入などについては課題が残されていた。

2. 研究の目的

本研究は、産業ニーズの根幹であり、次世代半導体製造技術のコアとなる電子線露光に特化した大型超精密ステージシステムの開発とその実用化を目的とする。この実用化という条件の基で、理論に裏付けられた新しい制御システム技術の開発と体系化をはかる。具体的には先行開発した超精密ステージ制御システムの実用化において不可避となる高耐久化や監視・診断技術、高性能化技術の確立を目指し、以下の実用化研究課題を遂行する。

(1) 高耐久化技術

開発したステージシステムの優位性は、ダイレクトドライブ（摩擦駆動）に依存する部分が大いだが、同時に、走行耐久性の向上と摩擦補償による制御性能の保証が実用化の最大の鍵となる。

本研究では、これまでに行った摩擦に関する基礎研究の結果より、特にステージ静止時に印加する静止摩擦力を超えた駆動力が偏摩耗を引き起こし、走行限界の要因となることを確認した。これより、摺動面摩耗防止のための制約付き駆動周波数可変制御によるスリップフリー駆動法に関する研究を行い連続走行耐久性の大幅な向上を目指す。

(2) リアルタイム監視・診断技術

SPIDER 駆動ステージは摩擦特性に起因し非線形時変システムである。本研究では摩擦特性を区分線形システムと捉え、過去の状態への依存度を変化させる可変忘却要素付き適応同定法を適用する。ここで、可変化した忘却要素に着目することでアクチュエータの駆動状態やその機構、摺動状態をリアルタイムで監視かつ劣化・故障診断する手法を確立する。

また、このリアルタイム同定情報に基づきモデル予測制御法を適応化させ、ステージが常に所望の制御性能を満たすことの出来る

同定法及び制御法の開発を行う。更に、この診断技術を基に摩擦の静特性に加え動的変化もリアルタイムで考慮可能な非線形同定法と制御法に関する研究も遂行する。

(3) ステージ大型化に起因する制御反力相殺のための統一的制御系設計法の構築

半導体製造用ステージは、搭載するウェハサイズの拡大とともに大型化している。これに起因しステージ可動部の制御反力から、精密ステージを搭載する除振台の振動問題が顕在化してきている。この制御反力相殺に、カウンターマスを装着し逆駆動する手法があるが制御系設計の複雑化に加え、装置の大型・高コスト化は著しい。

ここでは、位置制御系と力制御系の統一的設計法を提案する。また、制御剛性が異なることならびにステージ駆動力情報とその動特性を利用し、除振台アクチュエータにより反力相殺のための力制御系を構成し重心位置制御系を実現する。これにより物理的なカウンターマスを小型・不要化する制御手法の開発を行う。また、除振台アクチュエータにより仮想機械インピーダンス制御系を、またステージ系と除振台系でバイラテラルな制御系を構築し、アクチュエータの発生力内で振動を生じさせず、所望の制御性能を達成する擬似的な構造と制御の同時最適化を実現する。

3. 研究の方法

以下に、研究目的にて示した3つの課題を達成するための研究方法を示す。

(1) 高耐久化技術

- ①摩擦に関するこれまでの基礎研究の結果をベースに、100 mm ストローク(4 インチ ウェハ対応)精密ステージを用い、駆動周波数可変制御による摺動面摩耗防止のためのスリップフリー駆動理論を確立する。
- ②走行距離に対する摺動面状態と提案駆動法との相関解析を行い、提案手法の定量的な評価ならびに駆動法の改善を行う。実験は全てクリーンルーム(Class:1,000)内で行う。
- ③負荷重量や機構が異なるアクティブ除振装置付き大型ステージシステムに対し提案スリップフリー駆動法を応用・実験検証することにより、適応性やその効果など総合的評価を行い、その成果発表(特許・論文)とともに提案手法の実用化を目指す。

(2) リアルタイム監視・診断技術とその応用

- ①摩擦駆動の非線形時変特性を考慮した可変忘却要素付き適応同定手法に基づくシステム同定法、駆動状態診断法に関する理

論構築ならびに実験検証を行う。

- ②構築した適応同定理論によるリアルタイム監視・診断技術を基に、適応化予測制御理論の構築及び実験検証を行う。
- ③大型ステージ装置による提案手法の有効性の実験検証と同時に、その総合評価（特許・論文発表）を行い動的非線形摩擦に対する非線形同定法・制御法確立への発展を目指す。

(3) ステージ大型化に起因する制御反力相殺のための統一的制御系設計法の構築

- ①カウンターマスを除振台重心に対して変心配置することにより軽量化したアクティブ除振装置による反力相殺・振動制御理論を提案する。同時に、実験検証用の超精密 XY ステージ搭載アクティブ除振装置の製作を行う。
- ②カウンターマスフリー制御法ならびに製作したアクティブ除振装置により実験検証を行う。さらに、仮想機械インピーダンス制御とステージ・除振台系のバイラテラル制御により、擬似的に構造と制御の同時最適化を実現する制御理論の確立を行う。また、複雑系制御対象（ステージと除振台、多入出力、干渉項、非線形項）の高精度モデリング、ならびにシミュレーション解析技術を確認する。
- ③同時最適化に対する実験検証を行うとともに、これまでの実験検証を通じ、実用化を踏まえた総合評価を行う。また、本研究にてえられた成果を論文発表する。

4. 研究成果

本研究の目的は、「次世代半導体製造技術のコアとなる電子線露光に特化した大型超精密ステージシステムの開発とその実用化」である。この目的に対する実施項目と成果を以下に示す。

(1) スリップフリー駆動法に基づく高精度・高耐久化技術

本課題では、摺動面摩擦防止と定速制御時の速度ムラの低減のためのスリップフリー駆動理論を構築することを目的とする。これまでの制御では SPIDER の駆動周波数を固定し、その振幅を制御することによりステージを駆動していた。しかしながら、駆動周波数によるアクチュエータの最大速度と速度ムラにはトレードオフの関係があり、また、駆動周波数の変化量を制限することにより、摺動面の最大静止摩擦を超えることなくステージを駆動できることを確認した。

駆動周波数に対する同定実験結果より、駆動周波数変化は制御対象のゲインおよび極の変化に帰着することが確認できたため、ゲインスケジュールド制御を応用し、振幅と同

時に駆動周波数も可変制御とし、スリップフリー駆動が可能となる制御法を提案した。さらに、制御構造を次世代駆動となる連続軌跡追従制御系に拡張した。

このスリップフリー駆動法の有効性を、本課題(3)にて構築したアクティブ除振装置付き6自由度超精密 XY ステージシステム実験装置を用いて検証した。駆動周波数可変制御に関する制御性能の改善結果の一例を図1に示す。同図では、各駆動周波数におけるランプ指令に対する最大追従誤差を比較している。提案法(赤線)では各駆動周波数に対して追従誤差が悪化せず、かつ小さく抑えることが可能となることが確認できる。また、連続駆動耐久試験では、従来法に比べ3倍以上の走行距離がえられることを確認した。

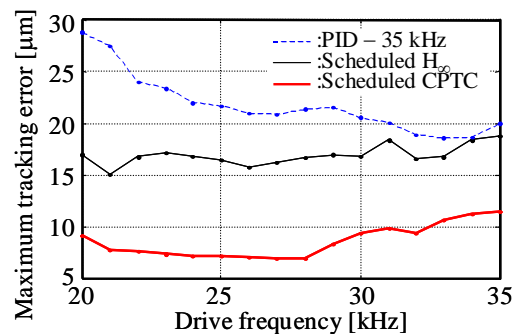


図1 駆動周波数変化に対する追従特性

(2) リアルタイム監視・診断技術とその応用

ステージのリアルタイム駆動状態診断を目的とし、まずは、実験的同定手法である可変忘却要素を用いた適応同定法を導入した。ここでは、非線形時変特性に対し忘却要素が変化することに着目し、摺動面の摩擦特性変化を検出、診断する手法を提案した。

本手法では、速度域により区分的に変化する摩擦特性を高速かつ高精度に同定できるため、ステージ制御における動的な摩擦補償法にも応用可能である。従来法である bang-bang 制御による静止摩擦補償の制御タイミングに対し、この忘却要素による判断アルゴリズムを用いた場合、ステップ指令に対する位置決め時間が80%以上短縮可能となる実験結果がえられている。

次に、適応同定結果を制御器に陽に組み込める、外乱オブザーバ付き内部モデル制御系(ADIMC)を提案した。制御系のブロック図を図2に示す。本制御手法により、アクチュエータをリアルタイムに診断するとともに、制御対象のモデル化誤差や経年変化、動作条件変化に起因する動特性変化に対し、所望の制御性能を適応的に保持する適応化内部モデル制御系を開発し、その有効性を実験により検証した。実験結果の一例として、矩形波指

令に対する追従誤差特性を図3に示す。摺動面の状態変化より、最初のステップでは追従特性が劣化しているが、動作を繰り返す毎に適応的に特性が改善されているのが確認できる。

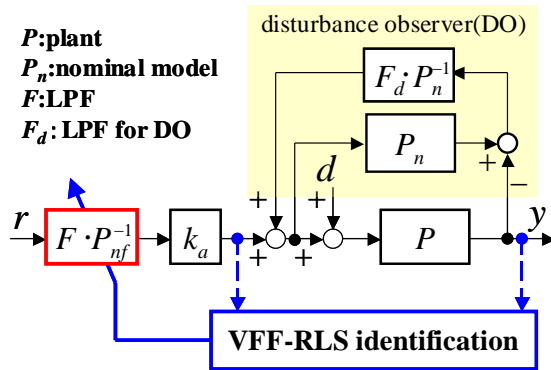


図2 適応化内部モデル制御系 (ADIMC)

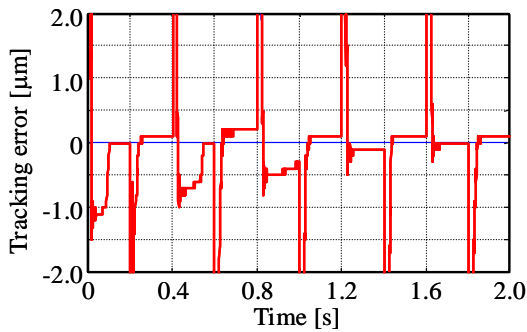


図3 ADIMC による特性変化に対する制御性能改善

(3) ステージ大型化に起因する制御反力相殺のための統一的制御系設計法の構築

まずは、本研究にて提案する同定法と制御法の有効性検証に必要不可欠となる超精密 XY ステージを搭載した反力制御装置付き 6 自由度アクティブ除振システム製作を行った (図4)。除振台は、ロール・ピッチモーメントを発生するアクチュエータ (VCM) を有し、位置センサと加速度センサによりその状態が検出可能な 6 自由度姿勢制御系となっている。また、現在主流のカウンターマスを使った反力制御法との比較検討のため、力制御系を持つカウンターマス制御装置の製作を行い、目的通り重心に対して変心配置している。

製作した除振システムに対して、本課題では部分空間法に基づく高精度な多入出力 (MIMO) 同定法を応用し、この MIMO 同定モデルより、制御帯域のみを設計パラメータとする簡便な位置制御と除振制御の統合化設計法を提案した。

MIMO 同定においては、位置制御系と振動制御系における制御帯域の違いを考慮し、デシ

メーション処理を導入している。同定結果 (周波数特性) の一例を図5に示す。比較のため、同定条件の良い単一入出力同定結果も重ねて示しているが、ステージは剛体モードが、また除振台は高次振動モードが良好に同定できていることが確認できる。ここで MIMO モデルの次数は 30 次としたが、制御用には実装を配慮し低次元化モデルを用いている。同図より低次モデルの周波数特性も同定モデルに良く一致していることが確認できる。

この MIMO 同定モデルに基づき、非干渉制御、内部モデル制御及び直接速度フィードバック制御に基づく位置制御系、反力制御系、振動制御系の統合化設計法を行った。構築した制御系は、その機械インピーダンスの違いから、位置制御、力制御 (振動制御) の非干渉化が容易である。また、干渉項を考慮したフィードフォワード手法により素早い制御も可能であるという特長を有している。

さらに、カウンターマスフリー制御系では、前述のバイラテラル制御系である位置制御系と除振台振動制御系により、ステージ重心移動なしを実現するよう構成した。この実現においては、前述の外乱オブザーバを導入した内部モデル制御に基づく高速・高精度制御手法を提案した。本提案の制御法は、フィードフォワード制御に基づいており、制御性能を維持するためにはモデルの適応化、すなわちリアルタイム同定が必須となるが、この適応化技術に、忘却要素を導入した適応同定法を応用し、高精度・高応答な制御系を構築した。

以上の有効性を構築した 6 自由度除振制御系にて実験検証した。精密ステージのステップ駆動時の振動制御実験結果 (過渡時の振動の最大変位と、定常時の二乗誤差和) の一例を表1に示すが、全ての軸において良好な振動除去特性がえられていることが確認できる。本課題にて開発した制御系の要素技術を導入した超精密ステージシステムは現在、共同研究企業により実用化開発が進められており、その結果なども報告されている。今後の更なる発展を目指す。

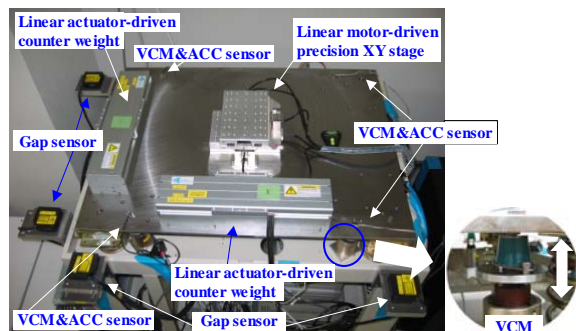


図4 構築した超精密 XY ステージ制御システム搭載 6 自由度アクティブ除振台

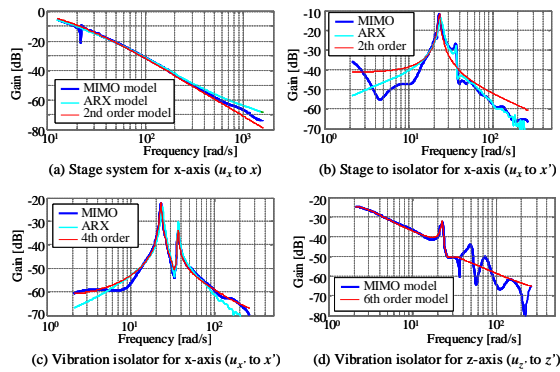


図5 MIMO 同定モデルの同定結果の一例

表1 6自由度アクティブ除振実験結果

	X-axis		Y-axis		Z-axis	
	max. error	squared error	max. error	squared error	max. error	squared error
non control	100%	100%	100%	100%	100%	100%
decoupling control	86.7%	37.5%	91.7%	91.5%	-	-
DVFC	60.0%	8.9%	58.3%	32.9%	65.7%	32.3%
proposed control	50.0%	7.1%	58.3%	29.1%	65.7%	25.4%

以上、本課題でえられた成果を雑誌論文（12編）ならびに国内学会（8件）にて発表した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計12件）

- ① S. Hashimoto and Y. Fujii: "Material Tester Using a Controlled Oscillator and an Inertial Mass," Journal of Key Engineering Materials, Vols. 381-382, pp. 457-460, 2008 査読有
- ② 橋本, 奥田, 岡田, 足立, 丹羽, 梶谷: 「一般化予測制御に基づくエンジン制御系の二段階設計法」, 電気学会論文誌D, Vol.128-D, No. 3, pp. 251-258, 2008 査読有
- ③ S. Hashimoto, T. Kondo and Y. Watanabe: "Predictive Control of Piezoelectric Actuators with Friction Drive Mechanism," Proc. of 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2008), pp.1842-1845, 2008 査読有
- ④ M. Nitta and S. Hashimoto: "Integrated Design and Control of Precision XY Stages with Active Vibration Isolator," Proc. of the 18th International Conference on Electrical Machines (ICEM'08), No. 862, pp.1-6, 2008 査読有

- ⑤ M. Nitta and S. Hashimoto: "Identification and Control of Precision XY Stages with Active Vibration Suppression System," Proc. of the 13th International Conference on Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC2008), No. 650, pp.947-952, 2008 査読有
- ⑥ S. Hashimoto, S. Goka and T. Kondo: "Model Predictive Control of Precision Stages with Nonlinear Friction," Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2008), TP-5, pp.829-833, 2008 査読有
- ⑦ T. N. Minh, K. Ohishi, M. Takada, S. Hashimoto, K. Kosaka, H. Kubota, and T. Ohmi: "Accurate Friction Compensation for a High Precision Stage using a Synchronous Piezoelectric Device Driver," IEEJ Trans. IA, Vol.127-D, No.1, pp.44-51, 2007 査読有
- ⑧ S. Hashimoto and Y. Fujii: "High-Precision Control of Linear Actuators with Nonlinear Friction," Proc. of 14th IEEE International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice 2007 (M2VIP2007), No.23, pp.62-67, 2007 査読有
- ⑨ S. Hashimoto, Y. Fujii, M. Kigure and T. Ishikawa: "High-Precision Control of Linear Actuators based on Internal Model Control," Proc. of 2nd IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2007), pp.2148-2153, 2007 査読有
- ⑩ 橋本, 大石, 小坂, 石川, 久保田, 大見: 「非共振型超音波アクチュエータ駆動精密ステージの位置決め制御における摩擦補償法」, 電気学会論文誌D, Vol.126-D, No. 6, pp.719-725, 2006 査読有
- ⑪ T. N. Minh, K. Ohishi, M. Takada, S. Hashimoto, K. Kosaka, H. Kubota and T. Ohmi: "Continuous Path Tracking System of High Precision Stage Using Synchronous Piezoelectric Device Driver," Journal of Advanced Materials Research, Vols.11-12, pp.121-124, 2006 査読有
- ⑫ S. Goka, S. Hashimoto, K. Ohishi, T. Ishikawa, S. Adachi, K. Kosaka, H. Kubota and T. Ohmi: "Variable Forgetting Factor-Based Friction Compensation Method of Precision Stages," Proc. of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, FE03-3, pp.3995-4000, 2006 査読有

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① 橋本：「一定振幅・離散時間入力に基づく位置制御法」，平成 20 年度電気学会全国大会，2009. 3. 19，北海道
- ② 橋本：「目標軌跡を考慮した可変構造制御時の過渡応答補償法」，平成 20 年度電気学会全国大会，2009. 3. 18，北海道
- ③ 橋本：「一定振幅離散値入力を用いた機械共振系の振動抑制制御法」，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会，2008. 9. 20，栃木
- ④ 橋本：「角度依存摩擦特性を考慮したシステム同定法に関する検討」，平成 20 年度電気学会産業応用部門大会，2008. 8. 28，高知
- ⑤ S. Hashimoto: "Disturbance Observer-Based Internal Model Control With An Adaptive Mechanism for Linear Actuators," SICE Annual Conference 2007, 2007. 9. 19, 高松
- ⑥ 橋本：「可変忘却要素を用いた適応同定法による超精密ステージの摩擦補償法」，平成 19 年度電気学会産業応用部門大会，2007. 8. 21，大阪
- ⑦ 橋本：「浮上質量法に基づく粘弾性材料試験装置の開発」，平成 19 年度電気学会全国大会，2007. 3. 19，福岡
- ⑧ 橋本：「内部モデル制御に基づく高応答・高精度制御手法」，電気学会産業計測研究会，2006. 9. 10，東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 誠司 (HASHIMOTO SEIJI)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30331987