

平成22年 3月 31日現在

研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2008 ～ 2009
 課題番号：20686028
 研究課題名(和文) 原子間力顕微鏡と位置決めステージのナノスケールサーボに関する研究
 研究課題名(英文) Research on Nano-scale Servo Control for Atomic Force Microscope and Positioning Stage
 研究代表者
 藤本 博志 (FUJIMOTO HIROSHI)
 国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：20313033

研究成果の概要(和文)：

本研究では、ナノメートルの領域で超高速かつ超高精度に位置決め制御を行なう技術をナノスケールサーボと定義し、これを実現するための基礎技術を研究することを研究目的とした。本研究課題では、申請者の研究室にて開発したその基礎制御技術を発展させ、我が国の科学技術の進歩に貢献するために、原子間力顕微鏡の深針として使用されているナノプローブと位置決め制御技術と、新しい他自由度ナノスケール位置決めステージの製作及びその制御に関する研究を行なった。

研究成果の概要(英文)：

The objective of this study is to develop the fundamental technology to realize nano-scale servo systems with high-speed and high performance positioning control systems. In order to contribute the progress of science, the advanced control method of nano-probe which is utilized in atomic force microscope. We also studied the novel design and fabrication of nano-scale multi-degree-of-freedom positioning stage.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2009年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

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：制御機器・高速高精度位置決め制御

1. 研究の目的

本研究では、ナノメートルの領域で超高速かつ超高精度に位置決め制御を行なう技術をナノスケールサーボと定義し、これを実現

するための基礎技術を研究することを研究全体の目的とする。その応用は、ハードディスクや光ディスクなどストレージや半導体や液晶の製造装置、新材料の開発や原子・分子レベルの測定や分子や原子の操作、ナノス

ケールロボティクスと多岐に渡る。本研究課題では、申請者の研究室にて開発したその基礎制御技術を発展させ、我が国の科学技術の進歩に貢献するために、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) の深針として使用されているナノプローブと位置決め制御技術と、新しいナノスケール位置決めステージ (以下ナノステージ) の製作及びその制御に関する研究を行なう。

2. 研究開始当初の背景

AFMを始めとする走査プローブ顕微鏡技術に関しては、日本は世界をリードする国の一つと言えるが、国内には、アドバンスト制御によるアプローチを行なっている制御工学の研究者は申請者のグループ以外には現在のところ存在しないようである。少なくとも制御工学関連の学会で発表されてはいない。一方で、海外の制御関連の国際会議では、この分野が数年前から大きく脚光を浴び、**American Control Conference (ACC)** やそれ以外の **IEEE** の国際会議で該当分野のセッションが組まれている。これらのセッションでは欧米の限られた一流大学の研究者が発表をしているが、申請者の研究室はそれらのセッションで発表や招待講演を行ない続け、この分野の日本のプレゼンスを示す存在となっている。

AFMの高速化に関しては、近年金沢大学の安藤教授らがビデオレートに近いリアルタイムでの撮像を可能とするAFMを開発し世界的に注目を集めた。この研究は独自の特殊なハードウェアによるアプローチで、生体分子の計測を主な目的にしている。これに対して、本研究では制御工学的なアプローチにより、AFMを高速高精度化することに成功した。用途を限定しない一般的なハードウェア構成のAFMに適用可能であり、ハードウェアの大きな改造が必要ない上に、Z方向の分解能や精度も高く、産業界からより実用的な手法として注目を集めている。

一方、AFMだけではなく各種製造装置などあらゆる産業分野で位置決めステージは使用されているが、数メートルという長いストロークを持ちながらも位置決め精度がナノスケールの領域に達している産業は、半導体及び液晶パネルの露光装置以外には存在しない。人類史上最も精密な機械と言われており、最先端科学技術の結晶の製品とも言える。我が国のメカは、この分野で健闘をしているが、海外特にヨーロッパにおいては該当分野の産官学にわたる共同研究が政府の主導で非常に盛んに行われている。

3. 研究の方法

4. 研究成果

(3節の研究方法与4節の研究成果の内容

を、まとめて下記に示す。)

申請者はこれまでに制御工学的なアプローチにより、AFMを高速高精度化することに成功した。この成果は、ハードウェアの大きな改造が必要ない上に、Z方向の分解能や精度も高く、産業界からより実用的な手法として注目を集めている。しかしながら、従来よりも10倍以上の高速化を達成したので、従来は大きな問題とはならなかった制御対象の非線形性の影響を考慮する必要が生じた。そこで2008年度では、AFMにおける非線形性を補償できる画期的な制御技術の研究開発を行った。

さらに研究開発をしたAFMの「表面形状オブザーバ」に関する技術においては、製品で早くも実用化され科学技術に大きく寄与するだけではなく、新聞報道されるなど啓蒙活動も行った。

さらに2009年度には、ナノステージの新しい設計法と制御法の研究開発を行った。スキャン方向と姿勢方向に自由度を持つ大型超精密多自由度ステージのミニモデルを製作した。このような並進方向と姿勢方向にも自由度を持つ高精度ステージの機構(形状、寸法、センサ及びアクチュエータの数と位置)と制御性能との関連性は、これまでに明らかにされていない。そこで本研究では、力学モデルから機構系と制御対象の伝達関数の諸特性の関連性を解析し、制御をしやすいような形状を明らかにすると共に、機構系と制御系の同時最適設計を行った。この装置は、実際に産業界で活用されている露光装置への応用を意識して設計製作したが、同サイズのステージを大学の研究室に設置することは困難であったため、本研究では、5分の1以下にスケールダウンをした、1.5メートル四方に収まるサイズのステージを製作した。実際の露光装置と性質がかけ離れないよう、有限要素解析により周波数特性や振動モードが適切になるような設計を行った後に、実際に試作をした。

製作したナノステージは、シャフト型リニアモータとエアガイドを用い、リニアレーザスケールにより1nmの分解能を達成した。インバータにより駆動するが、従来のような理想電流源と仮定をした設計ではなく、スイッチング動作を陽に考慮したPWMホールドモデルに基づく制御系の設計を行った。

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 8 件)

1. Kazuaki Saiki, Atsushi Hara, Koichi Sakata, and Hiroshi Fujimoto, "A Study on High-Speed and High-Precision Tracking Control of Large-Scale Stage Using Perfect Tracking Control Method Based on Multirate Feedforward Control", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 査読有, vol.57, no.4, pp. 1393--1400, 2010
2. 佐藤公彦, 藤本博志, "マルチレート PWM に基づく単相アクティブフィルタの電流制御法", *電気学会論文誌 D*, 査読有, vol.130, no. 2, pp.113-118, 2010
3. 浅海博圭, 藤本博志, "可変自然長ばねモデルと外乱オブザーバに基づくボールねじ駆動ステージの非線形摩擦補償", *電気学会論文誌 D*, 査読有, vol. 129, no. 11, pp. 1101--1108, 2009
4. Hiroshi Fujimoto, "RRO Compensation of Hard Disk Drives with Multirate Repetitive Perfect Tracking Control", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 査読有, vol. 56, no. 10, pp. 3825--3831, 2009
5. 坂田晃一, 藤本博志, 大友剛, 佐伯和明, "ステージ駆動力と表面形状を用いた大型超精密スキヤンステージのオートフォーカスレベリング制御", *電気学会論文誌 D*, 査読有, vol.129, no. 6, pp. 564--570, 2009
6. Hiroshi Fujimoto, "Short-Span Seeking Control of Hard Disk Drives with Multirate Vibration Suppression PTC", *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 査読有, vol. 4, No. 2, pp. 184--191, 2009 (invited)
7. 中井孝洋, 藤本博志, "繰り返し完全追従制御によるPMSMの高調波電流抑制", *電気学会論文誌 D*, 査読有, vol.128, no. 9, pp. 1083--1089, 2008
8. 安部洋則, 藤本博志, "インターサンプリングを用いた単相インバータの任意波形指令値に対するマルチレート完全追従制御", *電気学会論文誌 D*, 査読有, vol.128, no. 2, pp.110-116, 2008

[学会発表] (計 21 件)

1. Hiroyuki Endo, Hiroshi Fujimoto, "Short-Span Seeking Control of Hard Disk Drive Based on Integral Type Learning PTC", International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'10), Niigata, pp. 554-559, 2010.3.24
2. Koichi Sakata, Hiroshi Fujimoto, "Design Fabrication and Control of 4-DOF High-Precision Stage", International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'10), Niigata, pp. 366-370, 2010.3.23
3. Hiroyuki Endo, Hiroshi Fujimoto, "Short-Span Seeking Control of Hard Disk Drive with Learning Based PTC in Acceleration and

- Deceleration Period", *Proc. 35rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Porto, pp. 3176-3181, 2009.11.4.
4. Koichi Sakata, Hiroshi Fujimoto, "Proposal of Multirate PWM Positioning Control Considering Resonance Mode for Precision Stage", *Proc. 35rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Porto, pp. 3156-3161, 2009.11.3 (invited).
5. Kazuaki Saiki, Takachika Shimoyama, Koichi Sakata, Hiroshi Fujimoto, "Positioning of Large-Scale High-Precision Viscoelastic Stage Based on Vibration Suppression PTC", *Proc. 35rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Porto, pp.3150-3155, 2009.11.3 (invited).
6. Kento Nakamura, Hiroshi Fujimoto, Masami Fujitsuna, "Torque Ripple Suppression Control for PM Motor with High Bandwidth Torque Meter", *Proc. IEEE ECCE 2009 Proceedings*, San Jose, pp. 2572-2577, 2009.9.23.
7. Koichi Sakata, Hiroshi Fujimoto, "Master-Slave Synchronous Position Control for Precision Stages Based on Multirate Control and Dead-time Compensation", *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore, pp. 263-268, 2009.7.15.
8. Hiroaki Nishina, Hiroshi Fujimoto, "RRO Compensation of HDD Based on RPTC Method with Re-Learning Scheme for Discrete Track Recording Media", *Proc. 2009 American Control Conference*, St. Louis, pp. 3854-3859, 2009.6.11.
9. Koichi Sakata, Hiroshi Fujimoto, Atsushi Hara, Kazuaki Saiki, "Design Fabrication of High-Precision Stage and Ultrahigh-speed Nanoscale Positioning", *Proc. 2009 American Control Conference*, St. Louis, pp. 2254-2259, 2009.6.10 (invited).
10. Takayuki Shiraishi, Hiroshi Fujimoto, "High-Speed High-Precision Control of Atomic Force Microscope by Surface Topography Learning Observer", *Proc. 2009 American Control Conference*, St. Louis, pp. 961-966, 2009.6.10 (invited).
11. Takayuki Shiraishi, Hiroshi Fujimoto, "Observer Based Imaging and Feedforward Control for Atomic Force Microscope", *16th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy*, Japan, pp. 36, 2008.12.13.
12. Hiroshi Fujimoto, Takashi Oshima, "Contact-mode AFM Control with Modified surface Topography Learning Observer and PTC", *The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florida, pp. 2515-2520, 2008.11.12 (invited).

13. Atsushi Hara, Saiki Kazuaki, Koichi Sakata, Hiroshi Fujimoto, "Basic Examination on Simultaneous Optimization of Mechanism and Control for High Precision Single Axis Stage and Experimental Verification", *The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florida, pp. 2509-2514, 2008.11.12.
14. Kazuaki Saiki, Kazuyuki Hirachi, Koichi Sakaata, Hiroshi Fujimoto, "High-Speed and High-Precision Tracking Control of Large-Scale Stage Using Perfect Tracking Control with Disturbance Observer", *The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florida, pp. 2545-2550, 2008.11.11.
15. Kimihiko Sato, Hiroshi Fujimoto, "Proposal of Current Control for Single-Phase Active Filter Based on Multirate PWM", *The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florida, pp. 3155-3160, 2008.11.10.
16. Takahiro Nakai, Hiroshi Fujimoto, "Harmonic Current Suppression Method of SPM Motor Based on Repetitive Perfect Tracking Control with Speed Variation", *The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florida, pp. 1210-1215, 2008.11.10.
17. Takayuki Shiraiishi, Hiroshi Fujimoto, "High-speed Surface Topography Estimation and Reduction of Tracking Error for High-speed Atomic Force Microscope", *The 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology*, Japan, pp. 119, 2008.11.10.
18. Takayuki Shiraiishi, Hiroshi Fujimoto, "Realization of High-Speed Measurement AM-AFM Using Surface Topography Learning Observers", *SICE Annual Conference 2008*, Japan, pp. 2568-2573, 2008.8.21.
19. Hiroaki Nishina, Hiroshi Fujimoto, "RRO Compensation of Hard Disk Drives with RPTC Considering Correlation of Adjacent Tracks", *SICE Annual Conference 2008*, Japan, pp. 2562-2567, 2008.8.21.
20. Hiroyoshi Asaumi, Hiroshi Fujimoto, "Proposal on nonlinear friction compensation based on variable natural length spring model", *SICE Annual Conference 2008*, Japan, pp. 2393-2398, 2008.8.21.
21. Koichi Sakata, Hiroshi Fujimoto, Kazuaki Saiki, "Positioning of Large-Scale High-Precision Stage with Vibration Suppression PTC", *17th IFAC World Congress*, Korea, pp. 3124-3129, 2008.7.7.

[産業財産権]

○出願状況 (計 6 件)

1. 名称: 加減速時の LPTC を使用したショートスパンシーク制御を行う磁気ディスク装置の制御装置および制御方法
 発明者: 藤本博志, 遠藤弘之
 権利者: 横浜国立大学
 種類: 特許
 番号: *特願 2009-134274*
 出願年月日: 2009. 6. 3
 国内外の別: 国内
2. 名称: IPM モーター制御装置及び制御方法
 発明者: 藤本博志, 宮島孝幸
 権利者: 横浜国立大学
 種類: 特許
 番号: *特願 2009-013397*
 出願年月日: 2009. 1. 23
 国内外の別: 国内
3. 名称: 原子間力顕微鏡装置
 発明者: 藤本博志, 白石貴行
 権利者: 横浜国立大学
 種類: 特許
 番号: *特願 2008-231424*
 出願年月日: 2008. 9. 9
 国内外の別: 国内
4. 名称: PM モーターの制御装置及び制御方法
 発明者: 藤本博志, 中村建太
 権利者: 横浜国立大学
 種類: 特許
 番号: *特願 2008-216000*
 出願年月日: 2008. 8. 25
 国内外の別: 国内
5. 名称: 原子間力顕微鏡装置
 発明者: 藤本博志, 白石貴行
 権利者: 横浜国立大学
 種類: 特許
 番号: *特願 2008-212095*
 出願年月日: 2008. 8. 20
 国内外の別: 国内
6. 名称: RPTC による RRO 補償を行う磁気ディスク装置の制御装置および制御方法
 発明者: 藤本博志, 仁科裕章
 権利者: 横浜国立大学
 種類: 特許
 番号: *特願 2008-211015*
 出願年月日: 2008. 8. 19
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

- 名称: 制御システム
 発明者: 藤本博志
 権利者: 横浜国立大学
 種類: 特許
 番号: *特許第 4331385 号*
 取得年月日: 2009. 6. 26
 国内外の別: 国内

[その他]
ホームページ等

<http://fujilab.k.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 博志 (FUJIMOTO HIROSHI)
国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研
究院・准教授
研究者番号：20313033

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：