

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02042

研究課題名(和文) 超高分解変位計測・駆動システムによる空気中でのピコメートル位置決め制御

研究課題名(英文) Picometer positioning control in air by ultra-high resolution displacement measurement and drive system

研究代表者

明田川 正人 (AKETGAWA, MASATO)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：10231854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：メートル標準に準拠する2種のレーザ干渉計(ヘテロダイン・正弦波位相変調)とその位相計、及び超安定な平行バネ案内と圧電素子を組み合わせたステージを開発した。その結果どちらの干渉計システムでも10~20pmの機械的ステップ変位を観察できた。また、ノイズフロアも計測し周波数が高い領域(1~MHz)ではノイズ密度が1pm/root(Hz)以下になること、低周波(0.01~1Hz)では低周波になるほど空気揺らぎの影響が大きかったことがわかった。ただし当初狙っていたpmステップ変位の観察には至らなかった。これがこの研究の将来の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は次のとおりである。1)2種の干渉計(ヘテロダイン・正弦波位相変調)用の高精度(0.1mrad以下の分解能を有する)位相計を高速高精度AD変換器を有するField Programmable Gate Arrayで開発したこと、2)これらと超安定平行バネ圧電素子ステージ及び環境隔離チャンバーの採用により最小10pmの力学的ステップ変位を観察したこと、3)2種干渉計のノイズフロアを観察したこと、である。ただしpmステップ変位の観察には至っていないが、何がこれを阻害しているかの大まかな推論はたてられた。社会的意義としては、10pmステップ変位が実際に実現観察可能であることを示した点である。

研究成果の概要(英文)：Two types of laser interferometers (heterodyne and sinusoidal phase modulation) complying with metre standards, their phase meters and a stage combining ultra-stable parallel spring guidance and piezoelectric elements were developed. As a result, mechanical step displacements of 10-20 pm were observed with both interferometer systems. The noise floor was also measured and it was found that the noise density was below 1 pm/root (Hz) in the high frequency range (1~MHz) and that the lower the frequency (0.01~1Hz), the greater the influence of air fluctuations at lower frequencies. However, the observation of pm step displacements, which was initially aimed for, was not achieved. This is a future challenge for this study.

研究分野：精密工学

キーワード：干渉計 ステップ変位 超安定ステージ ノイズフロア pm 環境要因

### 1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーは半導体・光学素子製造技術などの微細加工進展を促して来た。この進展は一層加速し、一部の光学素子半導体デバイスではその加工精度に数 10pm を求める時代となりつつある(精密工学会誌 Vol.85, No.4, 2019 「特集:ピコテクノロジー基盤ものづくり」参照)。ピコテクノロジー開発のためには pm またはそれ以下の変位計測分解能と運動分解能を持つ変位計測制御システムが必要である。またその変位計測法はメートル定義に準拠することが必須である。pm 以下の計測運動分解能を正しく評価するにはその振幅または段差が pm 以下である方形波運動またはステップ運動をメートル定義に準拠したレーザ干渉計などで評価する必要がある。しかしながら今まで世界中で空气中(あるいは真空中)で、pm の方形波またはステップ計測運動評価を行った事例は存在しない。たかだか数 10pm 級の方形波またはステップ変位計測制御を空气中でレーザ干渉計と圧電アクチュエータで行った事例がイタリア計量研 INRM および応募者のグループでしかなく、pm 以下の変位計測制御を阻害する何らかの物理的障壁(pm 障壁)が存在すると応募者は想像している。応募者はこの pm 障壁を超え、空气中で pm 変位計測制御システムを産業応用することを目指した。

### 2. 研究の目的

次世代のピコテクノロジー基盤ものづくりを支援するために pm 以下の変位計測分解能と運動分解能を持つ変位計測制御システムを見いだすことがこの申請の目的である。具体的な目標として次を設定した。

**(目標 1) レーザ干渉計の位相分解能・安定性の向上と位相補間誤差の除去:** レーザ干渉計の位相分解能と安定性として 1 $\mu$ rad (633nm 光源のシングルパス干渉計で 0.05pm に相当) を目指す。さらに干渉計の周期誤差の除去も目指す。位相計測法としてヘテロダイン法と正弦波位相変調法を用いその優劣を比較する。

**(目標 2) アクチュエータ・ステージの運動分解能と安定性の向上:** サブ pm 以下の運動分解能と安定性を有するアクチュエータ・ステージ(駆動部と案内部)の設計を行う。駆動部として駆動範囲は 10 $\mu$ m と狭いが圧電素子、案内部として平行バネを第 1 候補とする。高剛性・熱変形・耐振動性・熱振動などを考慮する。

**(目標 3) pm 変位計測制御を阻害する要因(pm 障壁)の同定とその除去:** 計測部・アクチュエーションシステム・環境の阻害要因を同定する。真空も可能な環境制御チャンバーを製作しこの中に干渉計・アクチュエータを入れ、空気揺らぎ・空気屈折率揺らぎ・熱変形・熱振動などの要因を比較検討し pm の障壁を同定する。最終的にその障壁を除去し最終的には可能ならば常温常圧の空气中で pm 以下の変位計測分解能と運動分解能を持つ変位計測制御システムを見いだす。

### 3. 研究の方法

図 1 に示す変位計測制御システムを 2 個構築した。前述のようにヘテロダイン干渉計用と正弦波位相変調干渉計用である。いずれの干渉計でも、測定ミラーを載せた可動ステージはアクチュエータとガイドで保持され、コントローラからの指示信号(アンプ経由)によって運動させる。

その運動による変位をそれぞれの干渉計により光干渉信号に変換し干渉信号から位相復調するデジタル位相計により観測変位を抽出する。位相復調するデジタル位相計に Field Programmable Gate Array (FPGA)を採用し、高度で高速な演算を可能とした。観測変位は指令変位と比較されその差がゼロとなるよう（すなわち観測変位が指令変位と等しくなるよう）に PC に構成したコントローラでフィードバック制御を行う。**pm 障壁**の要因同定のため、アクチュエータ・ガイド・可動ステージ・アンプの剛性・耐振動性・熱特性・電気ノイズなどに注意を払う。それぞれの干渉計も同様に空気屈折率変動・空気揺らぎ・耐音性などの注意を払う。アクチュエータ・可動ステージと干渉計を内包できる環境保全チャンバー（雰囲気は空気および真空が可能）を製作した。

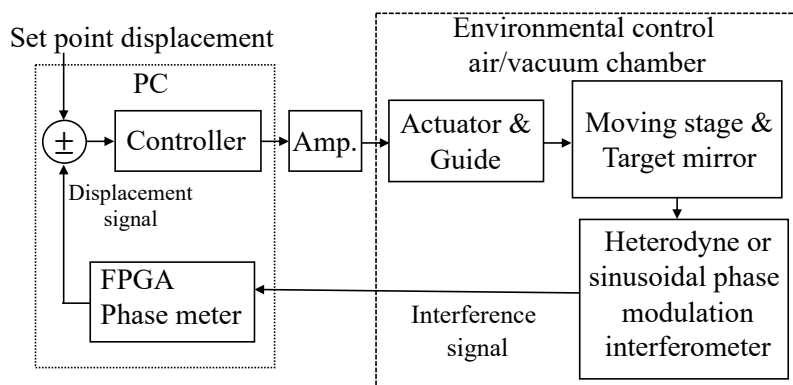


図1 構築した変位計測制御システム

干渉計は2種製作しそれぞれデジタル位相計をFPGAで構成した。

#### 4. 研究成果

(1) ヘテロダイン干渉計でステップ変位の観察：図2に開発したシステムで得られた22pmステップ変位（±11pmステップ変位）と11pm変位（±5.5pmステップ変位）（いずれも駆動周波数～1Hz）を示す。それぞれ真空チャンバー蓋を開け外気に晒した状態（どちらも(a)）、内部圧力は常圧であるが真空チャンバーを密閉した状態（どちらも(b)）、チャンバーを密閉し400Paまで減圧した場合（どちらも(c)）、チャンバーを密閉しさらに7～8Paまで減圧した状態、をそれぞれ示す。

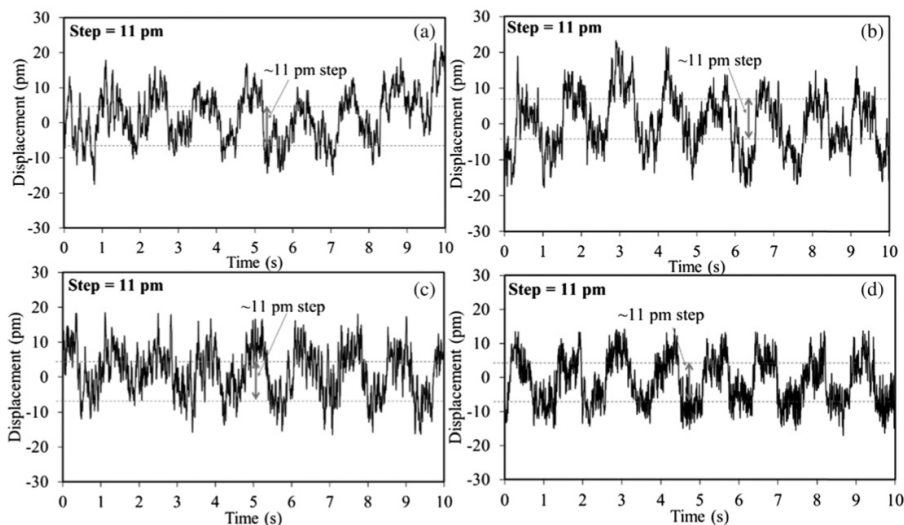


図2 開発した変位計測制御システムによる11pmステップ変位計測結果

図7と図8のいずれにおいても駆動周波数は1Hzと低いが、11pmまでのステップ変位を検出できることを示す。また低周波のドリフト成分に着目すると、真空でかつ圧力の低いほうがよりステップ変位が明瞭である。

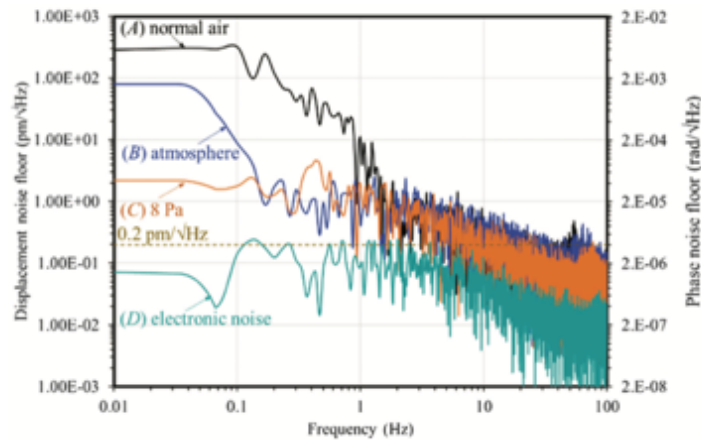


図3 開発したヘテロダイン干渉計のノイズフロア

干渉計のノイズフロアの観察：干渉計の可動ミラーを完全に固定し、空気環境条件の違いにより干渉計のノイズフロアがどのようになるかを実験した。結果を図3に示す。図中の横軸は周波数、縦軸は変位のノイズ密度と位相のノイズ密度をそれぞれ表す。図中の(A)は真空チャンバー蓋を開け外気に晒した状態、(B)は内部圧力は常圧であるが真空チャンバーを密閉した状態、(C)はチャンバーを密閉しさらに7~8Paまで減圧した状態、(D)は干渉計のエレクトロニクスのみ状態、である。低周波0.01-1Hzにおいて空気圧力が下がるとノイズフロアが減少することがわかる。それに比べ1-100Hzの領域の減圧による影響は少ない。空気揺らぎは低周波0.01-1Hz成分が支配的であることがわかった。(ここまでの図：図2~図3は著者らの本科研費による研究論文 <https://doi.org/10.1364/AO.400682> から引用した。)

(2) 正弦波位相変調干渉計とその専用圧電素子ステージ：図4にEOM2もしくは圧電素子に微小変位を与えたときの観察結果を示す。上から(a)EOM2に $\pm 15\text{pm} \cdot 10\text{Hz}$ のステップ変位を与えた

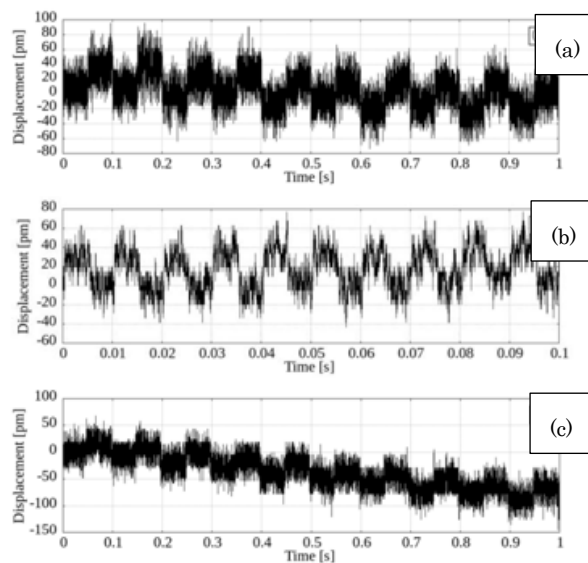


図4 帯域制限 (~3kHz)をしたときに正弦波位相変調干渉計で観察された微小変位。

(a)EOM2に $\pm 15\text{pm} \cdot 10\text{Hz}$ のステップ変位を与えた場合、(b)EOM2に $\pm 15\text{pm} \cdot 100\text{Hz}$ のステップ変位を与えた場合、(c)圧電素子に $\pm 10\text{pm} \cdot 10\text{Hz}$ のステップ変位を与えた場合

(b)EOM2 に±15pm・100Hz のステップ変位を与えた場合、(c)圧電素子に±10pm・10Hz のステップ変位を与えた場合、をそれぞれ示す。この場合銅チャンバーを用いた。

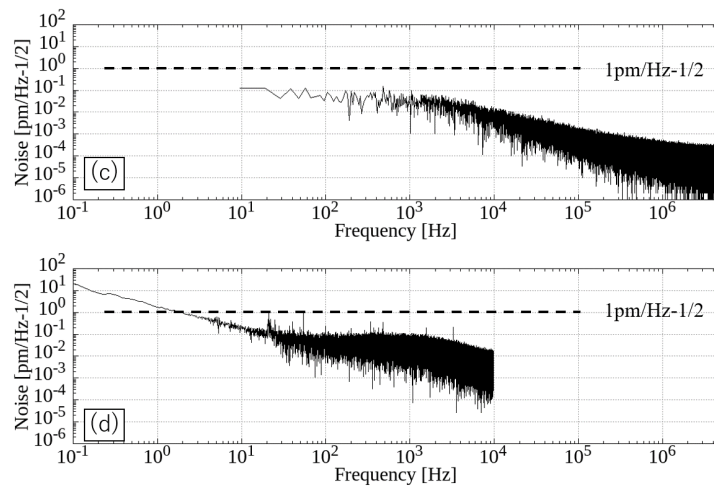


図5 帯域制限（～3kHz）かけた場合の正弦波位相変調干渉計システムのノイズフロア

図5に帯域制限をかけた場合のノイズフロアを示す。どちらも銅チャンバーを用いたもので帯域がそれぞれ(a)10～5MHz、(b)0.1～10kHz、である。同図(a)より帯域制限をかけたことによりノイズ密度が10～1kHzで $0.1(\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}})$ 程度になっており、それ以上の周波数ではさらに減少していることが判る。しかし同図(b)より低周波領域0.1～10Hz領域では低周波になるほど、ノイズ密度が上昇していることが判る。これは図3の結果とも矛盾せず、この周波数帯のノイズが主に空気揺らぎであることを示している。

注4(2)の結果は2023年6月現在に投稿中の論文データから抜粋した。

### (3) まとめ

ヘテロダイン干渉計及び正弦波位相変調干渉計とそれらの可動ミラー（またはEOM）を駆動するシステムを構築した。

\*それぞれのシステムで最小10～20pmのステップ変位を検出できた。特にヘテロダイン干渉計では空気中と真空中で検出できた。

\*それぞれのシステムの干渉計ノイズフロアを観察した。低周波のノイズは空気揺らぎである可能性が大きい。

\*最小分解能はpmまで至らなかった。この原因究明が次の研究課題である。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Higuchi, M., Wei, D., Aketagawa, M.	4. 巻 18
2. 論文標題 Displacement measuring interferometer for sub-nano meter resolution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement: Sensors	6. 最初と最後の頁 100336
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.measen.2021.100336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Thanh Dong Nguyen, Quang Anh Duong, Masato Higuchi, Thanh Tung Vu, Dong Wei, Masato Aketagawa	4. 巻 304
2. 論文標題 19-picometer mechanical step displacement measurement using heterodyne interferometer with phase-locked loop and piezoelectric driving flexure-stage	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 111880
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2020.111880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Thanh Dong Nguyen, Masato Higuchi, Thanh Tung Vu, Dong Wei, AND Masato Aketagawa	4. 巻 59
2. 論文標題 10-pm-order mechanical displacement measurements using heterodyne interferometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 8478-8485
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.400682	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 逆井康佑・明田川正人・福永琢真・白石隼瀬
2. 発表標題 干渉計用真空装置の開発と環境による干渉計動作比較評価
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口雅人・明田川正人
2. 発表標題 直接位相検出法の正弦波周波数変調法を適応した測長干渉計への応用
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片桐且成・明田川正人・樋口雅人・佐藤 拓
2. 発表標題 Field Programmable Gate Arrayを用いた高速正弦波位相変調干渉計の開発
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関