

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03155

研究課題名（和文）多色周波数安定化LDと高速カメラによる絶対面形状・高速面内変位計測法の開発

研究課題名（英文）Absolute surface shape / high-speed in-plane displacement measurement method using multicolor frequency stabilized LD and high-speed camera

研究代表者

明田川 正人（Aketagawa, Masatp）

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） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：2色のLD（633nm, 512nm）と1台の高速度カメラおよび1個の電気光学素子を用いて、これらに正弦波位相変調法を適用し、2色同時に動的な面内変位を計測可能な干渉計を構築した。これを用いてレーザービームの伝播する空間内の空気屈折率分布の時間変動を2色法を適用しながら捉えることができた。この成果によりレーザービームを直線基準として用いる真直度測定器の空気揺らぎ補正を可能とする目処を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動的な面内変位や絶対面形状の測定は精密工学などの発展に重要である。また光が伝播する面内の動的な（絶対）屈折率分布を知る手法も同様に重要である。動的な面内変位を測定する手法を開発し、これを光が伝播する面内の動的な屈折率分布測定に適用した。この結果は、レーザービームを直線基準とする真直度・角度測定に空気揺らぎによる測定不確かさの補正を可能とするものであり、精密機器産業への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：Applying the sinusoidal phase modulation method to an interferometer using two-color LD (633nm, 512nm), one high-speed camera and one electro-optical element, we can measure the dynamic in-plane displacement of two colors simultaneously. Using this method, we can capture the temporal variation of in-plane of the air refractive index in the space where the laser beam propagates while applying the two-color method. Using obtained result, we get a prospect of enabling correction of air fluctuations in a straightness measuring instrument that uses a laser beam as a straight line reference.

研究分野：精密工学 精密測定

キーワード：動的な面内変位 干渉計 正弦波位相変調法 高速度カメラ 空気屈折率分布 多色法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

産業界には次の2つのニーズがある。(ニーズ1) 高速・高精度面内変位計測。MEMS等の分野では、デバイスの運動に伴う面内変位を最大 10mm/s の速度・0.1nm 不確かさで捉えるという需要が存在する。(ニーズ2) 絶対面形状計測。これは超微細加工技術の進展に伴い、nm 以下の絶対精度を要求するものである。例えば EUV 投影露光ミラーの寸法と形状公差はそれぞれ 1m オーダ、0.1nm である。もし最大 1m の寸法をもつ製品の面内形状を 0.1nm 以下の不確かさで、絶対計測すれば、革新的工業製品の創成が可能である。この2つのニーズは空気中で達成されることが必要である。

またこのニーズ計測技術はメートル標準に準拠することが求められる。現在、産業界で多用され準工業標準となっている商用 HeNe レーザ干渉計(形状計測機含む)などは、ヨウ素周波数安定化レーザで光源周波数が校正され、メートル定義に準拠する。ただし、1) HeNe レーザの周波数安定性が  $10^{-8}$  とそれほど良くない(1m 範囲で 10nm の不確かさ)、2) 計測結果に nm 程度の位相補間誤差が混入する、3) 空気屈折率変動の影響を無視できない、という3つの理由で、空気中において絶対面形状計測あるいは面内変位計測には不向きである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、空気中で空気屈折率揺らぎを実時間で補正し 0.1nm 以下の不確かさで、2種の計測モード(高速・高精度面内変位計測 + 絶対面形状計測)を得ることである。特に高速・高精度面内変位計測の対象として、今まで計測実績の少ない空気屈折率の動的な面内分布測定を行うことも目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 2色周波数安定化レーザダイオード(LD)の開発

LD への正弦波位相変調とヨウ素の飽和吸収線を用いて、633nm DBR-LD と 1064nm 帯 DFB-LD とその第2高調波(532nm)の周波数安定化( $10^{-12}$ )を試みる。

#### (2) 画像ロックイン復調技術による高速高精度面内変位干渉計測の開発

高速度カメラを1台使い、これを正弦波位相変調干渉計観察カメラとする。上で開発する2色LDをこの干渉計の光源とする。位相変調は2色レーザ共用の電気光学素子 EOM でおこなう。面内変位に伴う位相成分は、変調信号の隣り合う偶数倍奇数倍高調波(例えば2倍波と3倍高調波)に含まれる。これを位相成分画像のロックイン復調技術を適用する。先に示す位相差をもつ画像の和差計算を行い、各波長毎に面内変位を逐次計算できる手法を開発する。

#### (3) 空気中で利用可能な面内変位計測と絶対面形状計測への進化

上で開発した2色の逐次変位計測結果に、2色法を適用し空気屈折率補正を行う。この結果をもとに対象面の動的な面内変位を計算する。さらにこの手法を絶対面形状計測への進化をはかる。特に上の手法を空気屈折率の動的な面内分布測定に応用する。

### 4. 研究成果

(1) 633nm DBR-LD と 1064nm 帯 DFB-LD + その第2高調波(532nm)の周波数安定化を行った。それぞれ  $10^{-11}$  程度の周波数安定性を得た(ジャーナルの2番目と学会発表の1~2番目参照)。

(2) 画像ロックイン復調技術による高速度面内変位干渉計の開発を行った(学会発表の3~5番目参照)。位相変調法として2色のレーザビームを同一の EOM を透過させ変調を行なった。2色での動的な面内変位を捉えることができた(学会発表の6番目参照)。

(3) 上の(2)では、EOM を利用して正弦波位相変調を行なっているが、EOM には強度変調が混入する場合がある。この問題を解決し上記(1)の LD の周波数安定性を向上させた(ジャ

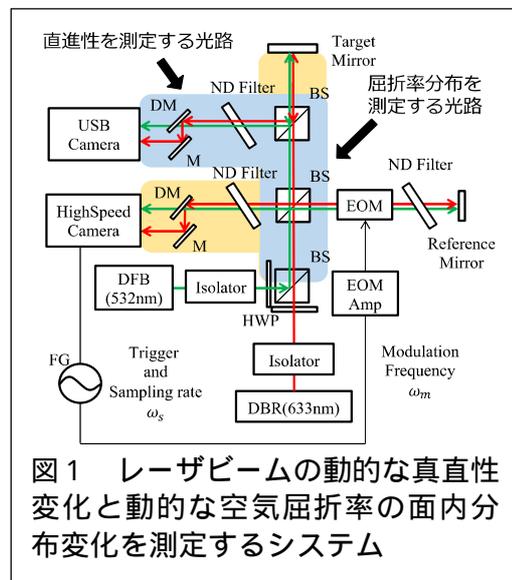


図1 レーザビームの動的な真直性変化と動的な空気屈折率の面内分布変化を測定するシステム

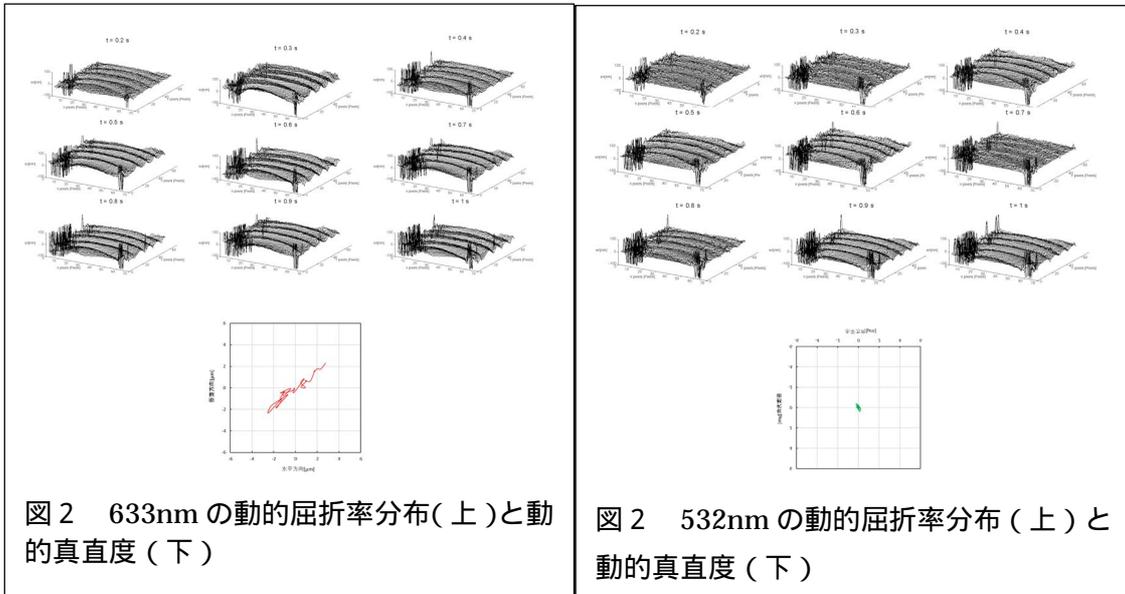


図2 633nmの動的屈折率分布(上)と動的直度(下)

図2 532nmの動的屈折率分布(上)と動的直度(下)

ーナルの1番目参照)。(4)上の(2)の2色面内変位干渉計の応用として、レーザービームの伝播する空間内の動的な空気屈折率の面内分布変化を測定し、これをレーザービームの動的な真直性変化(ビームポイントスタビリティ)と比較した。図1に開発した実験システムを示す。光源は上記の、633nm DBR-LDと1064nm帯DFB-LDとその第2高調波(532nm)である。EOMの変調周波数は1.2kHzであり、これより追従可能な空気屈折率の最大変化率は約120Hzとなる。図2と3にそれぞれ、赤色633nmと緑色532nmの動的屈折率分布と動的直度を示す。動的屈折率分布の横方向の大きさは1.4mm×1.4mm(70ピクセル×70ピクセル)で動的直度の縦横方向の最小単位は1μm×1μmである。赤色と緑色でそれぞれ屈折率分布が動的に変化していることがわかる。どちらの色も約0.5秒間の間に50nm相当の変位の変化が観察された。この実験での光路長は約1mであるので、これは屈折率変化でいうと5×10<sup>-8</sup>に相当する。これ以下の約5nmも捉えられておりこれは屈折率変化では5×10<sup>-9</sup>に相当する。動的屈折率分布の変動に伴い赤色と緑色の動的直度も揺らいでいる。逆に言えば、動的な屈折率分布(これはレーザービーム伝播面内の波面収差とも考えられる)が判れば、真直度も補正の可能性があることがわかった。干渉計で動的屈折率分布(波面収差に相当)を直接測定した事例はなく、Adaptive Opticsへの進展が期待される。なお、この実験では2色法による空気屈折率補正はまだ未着手である。この補正がなされれば別の波面収差の側面が観察されると考えられる(この(4)の成果に関しては今後発表予定)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Quang Anh Duong, Thanh Dong Nguyen, Thanh Tung Vu, Masato Higuchi, Dong Wei and Masato Aketagawa	4. 巻 14
2. 論文標題 Suppression of residual amplitude modulation appeared in commercial electro-optic modulator to improve iodine-frequency-stabilized laser diode using frequency modulation spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the European Optical Society-Rapid Publications	6. 最初と最後の頁 25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1186/s41476-018-0092-x">https://doi.org/10.1186/s41476-018-0092-x</a>	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 Quang Anh Duong, Thanh Tung Vu, Masato Higuchi, Dong Wei and Masato Aketagawa	4. 巻 29
2. 論文標題 Iodine-frequency-stabilized laser diode and displacement-measuring interferometer based on sinusoidal phase modulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 65204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1088/1361-6501/aab706">https://doi.org/10.1088/1361-6501/aab706</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 木原 心・樋口雅人・章 冬・明田川正人
2. 発表標題 531nm帯分布帰還型レーザダイオードの周波数安定化と変位計測
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安城雄大・樋口雅人・章 冬・明田川正人
2. 発表標題 633nm帯分布ブラッグ反射型レーザダイオードの周波数安定化と変位計測
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 獏・韋 冬・明田川正人
2. 発表標題 2次元面内変位干渉計によるレーザ直線計の評価
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Nakagawa, Masato Higuchi, Wei Dong, Masato Aketagawa
2. 発表標題 A New Demodulation Method for Sinusoidal Frequency/Phase Modulation Interferometer Without Lock-in Amplifiers
3. 学会等名 The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川盛太, 樋口雅人, 韋 冬, 明田川正人
2. 発表標題 正弦波周波数/位相変調干渉計のための新しい復調法の提案および画像データへの応用
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山琢弥, 大塚建斗, 樋口雅人, 韋 冬, 明田川正人
2. 発表標題 2色で2次元面内変位計測可能な正弦波位相変調干渉計の開発
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 変位計測装置	発明者 明田川正人ほか	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-039770	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分 担 者	平田 研二  (Hirata Kenji)  (40314364)	富山大学・工学研究科・教授    (13201)	2018年度に所属先変更