

令和元年6月22日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18421

研究課題名（和文）反射光が断続しても動作し続けるハイブリッドレーザ干渉型変位計

研究課題名（英文）Hybrid laser interferometer for intermittent displacement measurement

研究代表者

穀山 渉（Kokuyama, Wataru）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：70643485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：レーザ変位計（相対変位計）ではレーザ光が断続すると計測の連続性が失われ、位置のリセットが必要になるという問題がある。そこで、絶対距離計を相対変位計と同時・同光路で並行動作させデータを同期して取得し、それらデータから信号処理により、レーザ光が断続した場合にでも変位の連続性を再構成する方式を考案した。これは別研究で発明した高速高精度な位相読み出しを行えるデジタル位相計を中核として利用したものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体製造装置や精密機械加工等、精密ものづくりの場面において使われる一般的なレーザ変位計はナノメートル以下を計測できる高分解能を誇るものの、レーザ光を遮ってはいけない（計測のロバスト性が低い）という課題がある。本課題で考案したシステムはこの課題を解決できるので、工場の製造現場などの障害物が多い環境で使用する事ができるようになり、大きな波及効果があると考えている。

研究成果の概要（英文）：High resolution heterodyne laser displacement sensors have disadvantages that they need to be reset when the measurement beam is interrupted by something, since there is phase ambiguity of  $2\pi$ . We have invented the hybrid laser interferometric sensor, which combines robust laser distance meter with the high-resolution heterodyne interferometer on the same light path. The two data, displacement and distance, are simultaneously obtained using novel digital phasemeter developed in our previous works and processed with our algorithm to reconstruct true displacement after the beam interruptions.

研究分野：振動計測

キーワード：変位計測 振動計測 レーザ変位計 位相計

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

半導体製造装置や精密機械加工等、精密ものづくりの場面においては、レーザ光の干渉縞の数から変位を測定する「レーザ干渉測長計」(以下、レーザ変位計)が広く活用されている。これは、干渉を利用するためナノメートルオーダーの高い相対変位分解能を誇るが、対象への絶対距離がわからない相対変位計測であるため、レーザ光が遮られるたびに位置原点を失うといった不便がある。そのため、実験室並みによく管理された環境での使用に限定されており、工場の製造現場などの雑多な環境では適用が少ないのが現状である。よりロバストな計測ができる機器としてリニアエンコーダがあるが、レーザ変位計は光波長から計測値が直接算出されるため、トレーサビリティが取りやすい(計測値の信頼性を確認することが容易である)という利点がある。そのため、高分解能測定が可能なレーザ変位計のロバスト性を高めるという課題を解決することができれば、大きな波及効果がある。

ロバスト性が高い一つの変位計測方法は、絶対距離計測である。絶対距離計測器としては、強度変調/パルス変調レーザによる距離計(例えばトータルステーション)が広く普及しているが、内部の位相計の分解能に限界があり、絶対距離計測分解能が最高で数 mm と、機械系の振動計測等に用いるには十分ではない。他方で、光コムによる距離計・形状計測器も実用化されている。これは光パルス間の干渉を用いており、相対変位計測の分解能と絶対距離計測を両立させることが可能である。ただし、必然的にシステムが複雑化・高価格化するため、レーザ変位計を置き換えたり、あるいはその市場を広げられるほど、簡易・安価ではない。

## 2. 研究の目的

本研究では、ナノメートルオーダーの相対変位計測にマイクロメートルオーダーの絶対距離計測を組み合わせた、「ハイブリッドレーザ変位計」を開発する。このハイブリッド方式によって、一般のレーザ干渉変位計(相対変位計)では計測不能な「反射光が障害物に断続的に遮られる状態」においても、絶対距離計測が情報を補間することにより、計測の連続性を確保することができる。すなわち、計測器にとって重要な性能である「ロバスト性」を飛躍的に向上させるという意義がある。本方式は、申請者が以前発明した高分解能なデジタル位相計を活用することで実現が可能となる。

図1に、本研究で開発を行うハイブリッドレーザ振動計のアイデアを示す。相対変位計(ヘテロダイン干渉計)は、高い変位分解能があるが、図1の中ほどのように計測が途絶した場合、計測復帰後の変位に、真の値から $\lambda/2$ ( $\lambda$ はレーザの波長)の整数倍の不定性が生じてしまう。これは、ヘテロダイン干渉計の出力信号は $0^\circ \sim 360^\circ$ の位相で表現されるため、一旦位相の連続性が失われると $360^\circ \times N$ ( $N$ は整数)の不定性がでてくるためである。そのため、一般的な相対変位計を用いた計測現場では、このような計測途絶の後にはリセットをかけ、計測原点を新たに指定する、という運用がなされている。そこで、計測復帰後の変位計測値の真の値を特定するために、絶対距離計による同時計測を利用する。絶対距離計は、レーザの強度変調信号の位相差によって距離を計測する。そのため、強度変調周波数を6 GHz程度に設定し、さらに電気信号の処理に高分解能な位相計を用いれば、光波長を $\lambda$ として、 $\lambda/2$ である1マイクロメートル程度まで分解能を上げることが可能である。つまり、反射光が一旦途絶しても、絶対距離計測の結果と合わせることで、原点復帰が必要なくなる。

## 3. 研究の方法

次の順に研究項目に取り組むこととした。(1)絶対距離計と相対変位計を同時動作させる

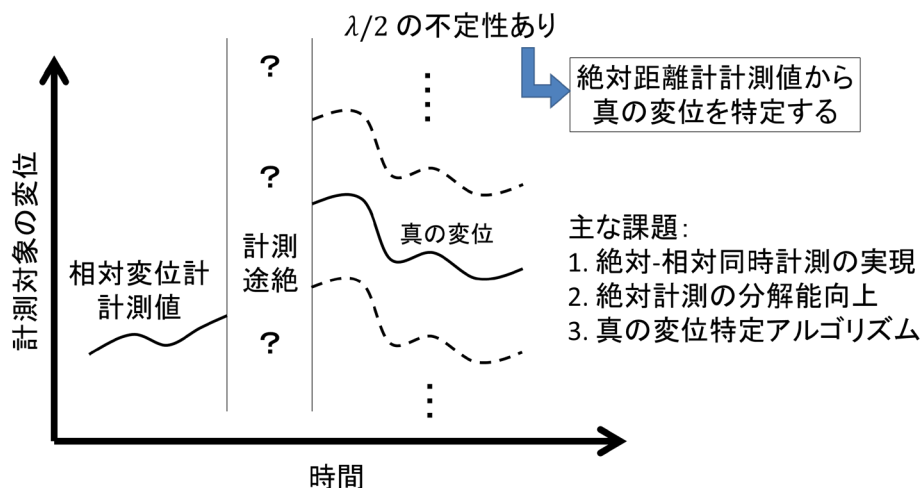


図1:本研究のアイデア(概念図)

セットアップを構築する。具体的には、同一の半導体レーザを光源とし、強度変調を加えた経路によって絶対距離計測を、周波数シフトを加えたヘテロダイン干渉計によって相対変位計測を、同じ測定ビームで実現する。(2)それらを動作させ同時計測によって得られたデータより、真の変位を推定する信号統合処理方法を開発する。具体的にはそれぞれ以下のように進める。

### (1) 絶対距離計と相対変位計の同時動作

まず、ファイバ光学系によって絶対距離計の構築に取り組む。半導体レーザからの出力にLN型強度変調器によって、正弦波強度変調をかける。レーザの波長は、光源や変調器、光ファイバが安価に入手できる1550 nmとする。強度変調には通信用LN型強度変調器を用いる。40 Gbps と十分な高速

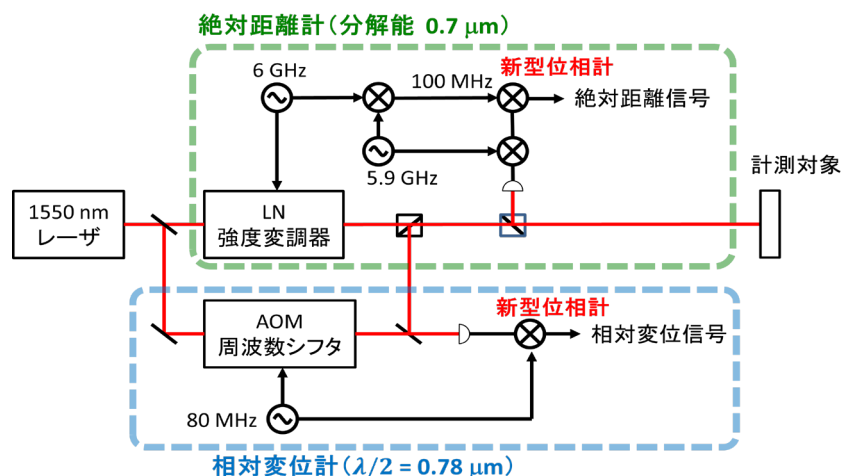


図2: 本研究で研究開発を行うハイブリッドレーザ振動計の概念図

動作が可能な製品に、6 GHz の変調信号を入力する。この変調周波数は、1/2 周期内に光が進む距離が 2.5 cm であるので、 $0.01^\circ$  の位相計測分解能のとき 0.7 マイクロメートルの変位分解能と、所望の性能が得られるように選定した。

位相計測には、研究代表者が別研究にて開発したデジタル位相計を適用する。これは、1 GHz、4ch デジタル化と FPGA が一体のボックスに格納されたものであり、200 MHz 以下の入力信号に対して、10 MHz 程度のサンプリング速度で位相を計測することが可能である。この位相計に信号を入力できるように、スーパーヘテロダイン法を採用する。具体的には、5.9 GHz のローカル信号とミキサを用いて 100 MHz にダウンコンバートする。

相対変位計は一般的なヘテロダイン干渉計である。図2のようにレーザ光源から一部をピックアップし、AOM 周波数シフタにより 80 MHz の周波数シフトを加える。この光と、計測対象からの戻り光を干渉させることで、80 MHz のヘテロダインビート信号を得る。このビート信号と、変調用の基準 80 MHz 信号との間で位相計測を行うことで、相対変位計測結果を得る。本課題で適用するデジタル位相計は、4ch の入力があり、2 組の信号の位相差を同期して計測可能である。よって、数十 ps 程度の同期精度で、絶対計測と相対計測の結果を同時に得ることが可能である。戻り光には 6 GHz の強度変調もかかった状態であるが、ビート周波数 80 MHz とは周波数が大幅に違うため、問題とはならない。

### (2) 真の変位を推定する信号処理手法の開発

次に、同時計測された2種の結果を統合する信号処理法を開発する。絶対変位計の分解能が  $\lambda/2$  より十分小さくなれば、簡単に真の変位が再構成できる。一方で、予想より大きくなった場合には、特別な対応を要する。例えば、単純なフィッティングにとどまらず、カルマンフィルタ等の信号処理法を適用することも検討する。問題点として、相対変位計、絶対距離計のそれぞれに混入する誤差要因が考えられる。例えば、相対変位計における周期誤差、絶対距離計における電気系の温度の揺らぎや AM-PM カップリングがある。これらは、巧みな統合処理、例えば周波数領域で比較しノイズ要因を同定・除去するなどの対策を取ることにする。

## 4. 研究成果

まず初年度は、研究計画に基づき、①絶対距離計、②相対変位計の構築検討をすすめた。研究開始時には、LN型強度変調器による絶対距離計と、AOM周波数シフタを用いた相対変位計が分離したコンフィギュレーションを想定していた。しかし、装置の詳細設計を進める中で、外乱の影響をより低減する必要があることがわかった。具体的には、相対変位計部分と絶対変位計部分のあいだに非共通の光学系および電気系が存在するので、そこに混入するノイズやドリフトが計測結果に想定よりも悪い影響を与えるであろうことがシミュレーションによって予想された。そのため、装置の耐雑音性をより高める構成を新たに考案した。具体的には、絶対距離計の信号読み出し部をスーパーヘテロダイン方式から光領域でのダウンコンバートに変更することで、RF位相変動に対する耐性をより高めることとした。その他にも、干渉計光学系部や、光源の強度変調・位相変調の方式の変更など、設計を見直した。

さらに、本研究で鍵となる、デジタル位相計の高度化研究開発も進めた。具体的には、入力信号の同期精度を高めるようハードウェアロジックを変更した。さらに、AD変換器の動作周

波数付近の高周波ノイズが折り返される（エイリアシング）のために、低周波領域において見かけ上の変動が発生する現象が見られたため、それを低減するために初段のアンチエイリアシングデジタルフィルタを導入した。ハードウェアの構築のために要素部品を調達しようとしたところ、納期が予想より長くかかることが判明したため、装置全体の組み上げは持ち越しとなったが、上記設計変更により、想定性能を計画段階より向上させることができたという成果が得られた。

二年度めは、初年度の成果をふまえ、システムの組み上げを試みた。しかしながら、研究途中において新たな競合する先行研究を発見した(Lay et al. Optics Letters 28, 890, 2003)。この先行研究は宇宙機のあいだにおける高ダイナミックレンジ絶対距離計測の基礎実験であり、その光学系の動作原理は、本研究における原理と非常に似通っており、本研究のオリジナリティに関しての再考および研究戦略の練り直しを余儀なくされた。検討した結果、本研究ではデジタル位相計を用いることで高速高精度な位相読み出しを行えることが特徴であるから、その利点を生かした高速測定への方針転換を行うことにした。また、ロバスト性を担保できることも大きな特徴であるから、それをより強調するような実験を行うこととした。以上より、実際のデータに基づく成果を得ることはまだ出来ていない。なお、研究代表者の海外研究渡航に伴い、実験実施時期は先送りとなっている。研究に必要な物品はすべて調達したので今後は研究費を使用しない（年間10万円を下回る）ことから、本研究課題を期間延長せず一旦区切りをつけることとした。しかしながら、上記システムを実現し成果を得るために今後も引き続き取り組んでいく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。