

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04100

研究課題名（和文）微小変位計測によるデジタル出力型三軸加速度センサの評価技術の開発

研究課題名（英文）Development of evaluation technology for digital output type triaxial accelerometer by measuring small displacement

研究代表者

野里 英明（Nozato, Hideaki）

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・研究グループ長

研究者番号：60415726

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：低ノイズのMEMS三軸加速度センサへの入力値を測定するレーザー干渉計や信号収録装置・プログラムを改良した。またホプキンソン棒に対して、積層型圧電素子を用いた再現性の高い微小変位の発生可能な電気的な加振方法を開発した。さらに、SPIのデジタル信号を収録するモジュールと振動変位を計測するレーザー干渉信号を収録するモジュールの同期計測を可能とし、デジタル出力型加速度センサの感度だけでなく、位相シフトも評価可能なシステムを製作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年ダムやビル、橋梁等の社会インフラの老朽化が進んでおり、我が国の社会問題となっている。これら社会インフラの劣化診断を行う有力なツールの一つとして、安価で大量生産が可能となってきたMEMS型加速度センサを用いた常時モニタリングがある。そのため、低周波で微小変位を計測するためのMEMS三軸加速度センサの周波数応答に対する評価技術を確立することは重要な技術課題である。

研究成果の概要（英文）：The laser interferometer that measures the input value to the low-noise MEMS three-axis accelerometers, as well as the signal recording device and program were improved. We also developed an electrical excitation method for the Hopkinson bar that uses a stacked piezoelectric exciter to generate highly reproducible micro-displacements. Furthermore, We created a system that enables synchronous measurement of a module that records SPI digital signals and a module that records laser interference signals that measure vibration displacement, enabling them to evaluate not only the sensitivity of digital output accelerometers, but also the phase shift.

研究分野：計測工学

キーワード：三軸加速度センサ 評価技術 デジタル出力 微小変位 レーザ干渉計

1. 研究開始当初の背景

インフラの劣化診断や建造物の変形モニタリングは、1000兆円に達するであろう我が国のインフラ資産を健全に保全する上で不可欠な要素技術である。地震観測や建造物の変形モニタリングで使用される広帯域地震計やサーボ加速度計は代表的な高感度センサであるが、近年の低ノイズデジタル出力型三軸加速度センサは数十 $\mu\text{G}/\text{rtHz}$ のノイズレベルと数kHzの帯域をもち、計測可能な変位は数十 μm になることから、それら高感度センサとほぼ同等であり、今後はインフラの劣化診断および建造物の変形モニタリングだけでなく観測機器のぶれ補正や自動運転の正確性を担保するキーデバイスという重要な位置づけをもつと予想される。しかしながら、デジタル出力型三軸加速度センサは低ノイズであるものの、ノイズレベルと比較して個体間における感度や特性のばらつきが大きいと、少ない測定点で確度の高い計測(絶対値の正しい加速度計測)には不向きであるだけでなく、デジタル出力型三軸加速度センサの周波数応答を評価可能な計測システムは不在である。

2. 研究の目的

デジタル出力型三軸加速度センサを評価対象にした三軸微小変位計測システムを開発することが本研究の目的である。これを達成することにより、広帯域地震計やサーボ加速度計では不可能であった、安価で広帯域な三軸微小加速度計測が実現可能となる。

本研究のヘテロダイン式レーザ干渉計は、キャリア周波数が80MHzであることから、大量のデータを記録するため、計測システムのメモリの制約より測定時間は1msに限られていた。そのため、評価可能な加速度センサの周波数応答は1kHz以上であるので、レーザドップラ振動計を高精度に評価することで、測定時間の長時間化を図り、加速度センサの周波数応答を1Hzから1kHzの周波数範囲で評価可能にすることを旨とする。もしくはFPGAを用いた長時間計測を実現する。そこで、本研究での開発指針と従来研究との相違点を独自性として以下にまとめる。

- ① 三軸微小変位発生装置とそれを計測可能なレーザ干渉計を開発する。レーザ干渉信号に対して、FPGAを用いた平均化とダウンサンプリングにより、加速度センサを1Hzまで評価可能な長時間計測を行う。1/100のノイズ低減を目標とする。もしくは、レーザドップラ振動計を高精度に評価可能にすることで長時間計測を可能にする。
- ② 加速度センサから出力されるデジタル信号の読み出しプログラムを作製する。また、そのデジタル信号は、アナログのレーザ干渉信号と同期して計測されるようにする。
- ③ 電気光学変調器(EOM)を用いて、レーザ干渉計の応答性を1MHzまで評価して、3台のレーザ干渉計の間で応答性を揃えた計測を行う。

3. 研究の方法

開発指針①【研究代表者が実施】

発生する加速度波形は、ホプキンソン棒の材質と断面積、加振力で主に決定されるので、それらを調整して、加速度レベルの低減とパルス幅の延長を実現する。加振方法は、金属の飛翔体をホプキンソン棒へ衝突させていたが、100Hz以下の低周波まで応答性能をもつ圧電素子を用いた電氣的な手法へ変更する。加振力を弱めるだけでなく、再現性を高めるメリットがある。併せて、ヤング率に対する音速の比が低い材質でホプキンソン棒を製作し、その端面の断面積を大きくすることで加速度波形のピーク値を低減する。次に、レーザ干渉計のノイズと地面振動を低減する。ホプキンソン棒端面に対する垂直方向には、数十 μm の変位が予想されるので、ノイズレベルを数十 μm からサブ μm へ低減したい。また、アクティブ除振台の上にレーザ干渉計を搭載することで、地面振動の低減を1Hz以上で実施する。

開発指針②【研究分担者が実施】

デジタル出力型センサは、I2CやSPIといったプロトコルに準拠しており、それらのデータ取得を可能にするFPGAプログラムを開発する。別装置において、同研究分担者はkHzオーダーでアナログとデジタルの両データが同時計測可能なところまで開発が進んでいる。

開発指針③【研究代表者が実施】

レーザ干渉計の応答性を評価するためには、高速で動作する振動体と別途基準となるレーザ干渉計が必要である。動電型加振器では数十kHzが上限となるので、屈折率を高速で変化させることのできるEOMを振動体として用いる。基準とするレーザ干渉計の電気回路を回路シミュレータ(LTspice)で評価したところ、14.6nsの時間遅延であった。さらにこの結果を用いることで、EOMの時間遅延が7.1nsであることも示した。このように基準となるレーザ干渉計の確立に目途がついており、基準となるレーザ干渉計と三台のレーザ干渉計の応答性をそれぞれ比較評価することで、三台のレーザ干渉計で同期の取れた三軸計測を行う。

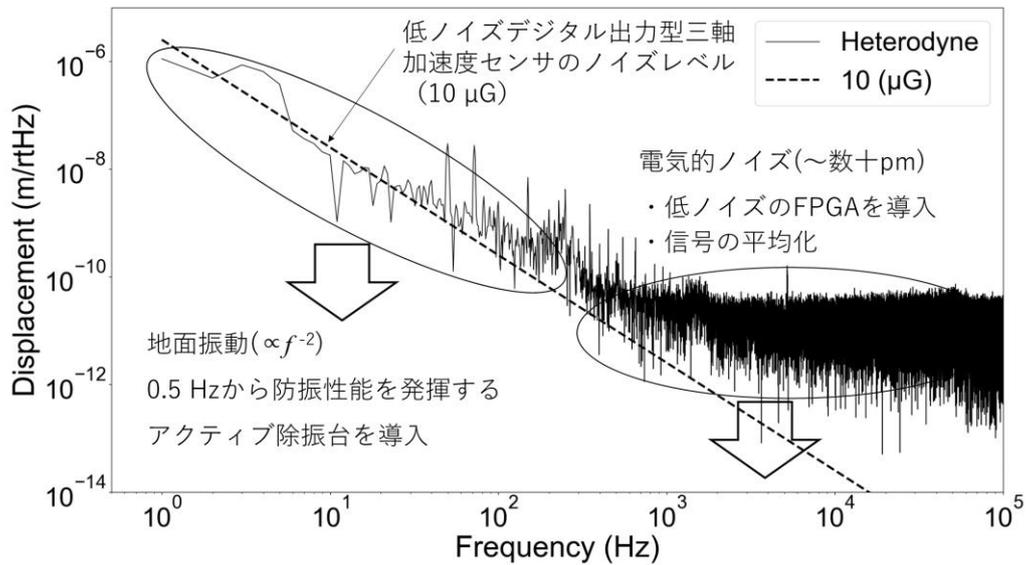


図 1 : ヘテロダイン式レーザ干渉計のノイズレベル

4. 研究成果

本研究で評価対象と想定するのは、インフラや建築の業界でよく使用されているデジタル出力型加速度センサ ADXL355 もしくはアナログ出力も可能である ADXL354 であることから、1 kHz の帯域をカバーする加速度入力をホプキンソン棒で実現する。帯域を 1 kHz 以下としたのは、加速度センサの取付の影響（接触剛性）によって、加速度センサへ入力される加速度を正確に計測することが困難だからである。一方で、ホプキンソン棒の端面に取り付けた加速度センサに対して再現性の高い加速度入力を行うため、ホプキンソン棒の端面にネジ穴を設けてピエゾアクチュエータを取り付けた。これまでは圧縮空気で加速した金属片をホプキンソン棒端面に衝突させていたため、衝突姿勢の繰り返し性が悪く、その結果得られる加速度波形の再現性が悪かったため、これを改善を行った。

また、3 台の LDV の測定にかかる応答速度（時間遅れ）を電気音響光学素子による評価手法から高精度に見積もったので、3 台の LDV で同期の確保された高精度な 3 方向からの加速度計測が可能となった。これに伴い、3 方向から互いに直角な XYZ の 3 軸方向に対して、加速度信号を得るプログラムを作成した。加速度センサへの入力加速度である、1 kHz 以下のパルス的な加速度を測定できるようになったことから、今後はデジタル出力型三軸加速度センサのデータ取得を行う収録系の構築を行い、デジタル出力型三軸加速度センサの評価を行う予定である。

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hideaki Nozato, Wataru Kokuyama, Tomofumi Shimoda, Hajime Inaba	4. 巻 70
2. 論文標題 Calibration of laser Doppler vibrometer and laser interferometers in high-frequency regions using electro-optical modulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 135,144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2021.01.016	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 -

1. 著者名 Tomifumi Shimoda, Wataru Kokuyama, Hideaki Nozato	4. 巻 58
2. 論文標題 Primary calibration system for digital accelerometers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 45002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1681-7575/ac0403	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野里英明、穀山渉、下田智文
2. 発表標題 光学励振を用いたレーザドップラ振動計の比較校正に関する検討
3. 学会等名 2022年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野里英明、穀山渉、下田智文
2. 発表標題 電気光学変調器を用いたホモダインおよびヘテロダインレーザ干渉計の時間応答に関する評価
3. 学会等名 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
研究 分 担 者	下田 智文 (Shimoda Tomofumi) (60880763)	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・研究員 (82626)	

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
---------	---------