

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14273

研究課題名（和文）接触剛性に起因する高周波振動計測偏差の補正法の開発

研究課題名（英文）Development of a correction method for high-frequency vibration measurement errors caused by contact stiffness

研究代表者

下田 智文（Shimoda, Tomofumi）

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

研究者番号：60880763

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、加速度センサを用いた高周波振動計測における接触剛性の影響を調べた。接触剛性がセンサの感度特性に影響するメカニズムを示す力学モデルを構築し、加振実験でその妥当性を確認した。実験結果からは、加速度センサの計測対象によって感度特性が変化する様子も確認され、力学モデルとの比較から対象ごとの接触剛性の大きさの定量的評価を実現した。さらにヤング率と接触剛性の関係も定量的に調べ、これに基づいて感度特性を推定・補正することで振動計測の精度向上につながる展望が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見は、高周波振動計測の精度を制限する主要因のひとつである接触剛性について、定性的・定量的な両面で理解を深めたものである。特に定量的な面は先行研究で十分に評価されておらず、評価方法も含めて本研究が新たに提案・実証したことで、加速度センサ感度の補正を可能にする展望を拓いた。これにより近年産業ニーズが高まりつつある高周波振動計測の精度向上に役立てられるほか、関連する計量標準の整備にも貢献できると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, the effect of contact stiffness on accelerometer sensitivity in high-frequency vibration measurements was studied. First, a dynamical model of an accelerometer was developed to explain the mechanism by which contact stiffness affects the frequency characteristics of accelerometer sensitivity. The validity of the model was confirmed through experiments. The experimental results also showed that the frequency characteristics of the sensitivity change depending on the measurement target. By comparing the measured characteristics with the dynamical model, the contact stiffness was quantitatively estimated, and its dependence on the Young's modulus of the target was determined. Furthermore, we have gained insights into improving vibration measurement accuracy by estimating and correcting the accelerometer's sensitivity based on the obtained dependency.

研究分野：計測工学

キーワード：加速度センサ 振動計測 接触剛性 レーザー干渉計 計量標準

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

加速度センサを用いた振動計測は産業・研究などに幅広い応用を持つ基礎技術の一つである。計測周波数・振幅範囲は広範にわたっているが、研究開始当初の2020年頃には特に産業用回転機器の状態基準保全や車載インバータの性能評価等の目的から数kHzを超える高周波振動の計測ニーズが高まってきていた。振動の計測には接触式(加速度センサ)・非接触式(レーザードップラー振動計)など様々なデバイスが使われるが、比較的安価な振動計測手法として加速度センサが普及しており、センサの計測周波数上限である約25kHz程度までが主な計測対象とされている。状態基準保全は機器の振動を継続的に計測することで、異常振動の検知や振動レベルの推移から損傷・劣化を察知しメンテナンスに活用するもので、不具合発生率の低減やメンテナンスコストの削減が期待されている。近年のIoT技術の進展と相まって振動計測による保全は今後産業において重要な要素技術になることが予想される。

効果的な異常検知のためには正確な振動計測技術が不可欠であり、そのためには加速度センサの感度特性(対象の振動に対するセンサ出力電気信号の比)を知る必要がある。しかし数kHzから25kHzの高周波数帯ではセンサ内部構造および取付面の接触剛性によって機械共振が起こり、感度は大きな周波数依存性を持つ。しかも接触剛性に起因する周波数特性は接触条件(取付方法や取付先の材質・表面状態)に依存するため評価・予想が難しい。このことがセンサの正確な感度を知るうえで妨げとなるのが、特に計量標準の分野でここ15年ほど国際的に問題視されてきた。レーザードップラー計と比較することで単一条件下での加速度センサ感度を測定(校正)することはできるが、接触条件が変わると20kHz付近では数10%もの偏差が生じうるため、条件が一定に保たれるとは限らない実際の振動計測においては実用性が不十分である。すなわち数kHzから25kHz帯においては、センサ接触状態の不確かさのため振動計測の確度を上げることができない状況にあると言える。接触剛性の寄与を補正し振動を高い確度で計測することは、広い産業分野に資する重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は25kHz以下での振動計測の確度を高めることである。そのためまず加速度センサの力学モデルを構築・検証し、接触剛性により周波数特性が変化するメカニズムを明らかにする。センサ構造と接触剛性はバネ-マス系でモデル化することができ、感度の周波数特性は振動計測対象の帯域外(典型的には30kHzから100kHz)にいくつかの共振ピークをもつ。先行研究でも2連成バネのモデルは用いられていたが、100kHzまでの特性を説明するには不十分であったため、より正確なメカニズムを明らかにするために、センサ筐体の寄与も考慮した3連成バネモデルを新たに構築する。さらに、周波数特性に現れる共振ピークの組み合わせが接触剛性に対応するため、出力の共振ピーク周波数からセンサ感度の周波数特性(接触剛性の大きさ)を推定し補正する手法を検証する。接触剛性の推定が可能になれば、計測対象帯域(<25kHz)の周波数特性の推定が可能となり、補正による確度の向上が見込まれる。

3. 研究の方法

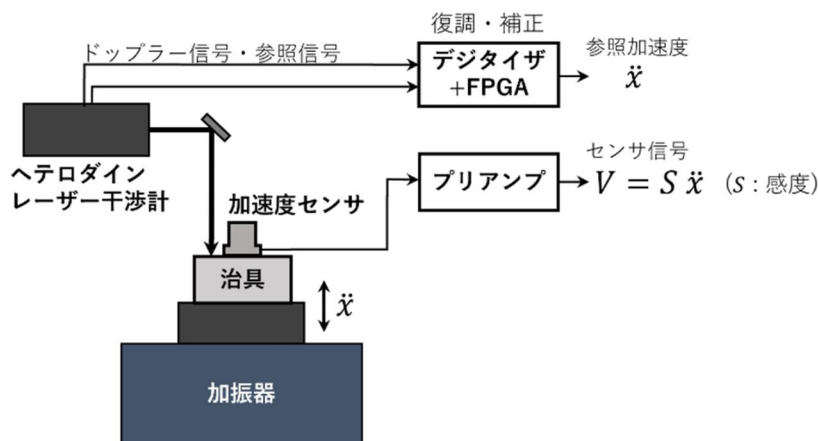


図1. 高周波振動発生・計測装置

本研究では25kHz以下における周波数特性推定・補正手法の検証を行う。検証実験は図1に示す高周波振動発生・計測装置を開発し用いる。装置は加振器とレーザードップラー計で構成され、計測対象を模した治具と加速度センサを取り付け加振する。レーザードップラー計はレーザードップラー波長を基準として精密に治具表面の振動を計測することができるためこれを参照加速度信号として用い、加速度センサの出力信号と比較することでセンサ信号・特性の評価を行う。

まず原理検証として、力学モデルの検証を行う。センサ感度の周波数特性を測定するために、センサに正弦波振動を加え、その時のセンサ出力信号とレーザー干渉計信号の振幅比からセンサ感度を求める。周波数を変えて測定を繰り返し、1 kHz から 100 kHz までの範囲での周波数特性を得る。得られた周波数特性の共振構造が、力学モデルからの予想と合致するかを確認し、さらに接触剛性の大きさをパラメータとしたフィッティングを行う。これらをもとに力学モデルの妥当性を確認する。

続いて様々な材質にセンサを取り付けて同様に測定を行う。材質による周波数特性の変化を見るとともに、各材質での特性が力学モデルに合致することを確認する。さらにモデルによるフィッティングを行い、接触剛性パラメータの材質依存性を調べることで、パラメータを介して共振構造と計測帯域内感度を対応付ける。

最後に実際の振動計測を模したランダム加振を加速度センサに加える。加速度センサの出力信号のスペクトルからピーク周波数を同定し、前述の対応から周波数特性の推定を試みる。このときレーザー干渉計信号も同時に取得することで真の周波数特性(推定の答え)が分かるようにしておき、推定結果と比較することで検証する。

4. 研究成果

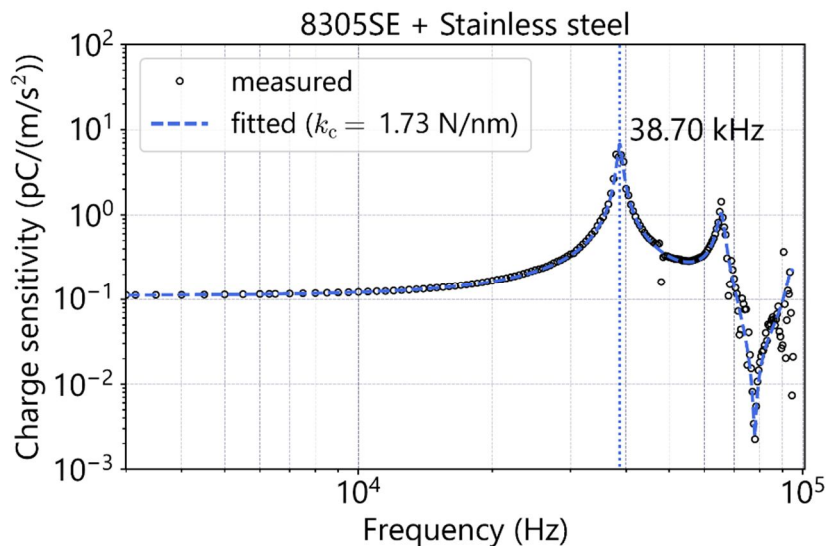


図2. センサ感度の周波数特性測定値と力学モデルからの予想(ステンレス治具)

研究では、超硬タングステン・純タングステン・ステンレス・チタン・アルミニウム製の治具に加速度センサを取り付け、前述の方法で周波数特性を測定した。結果の一例として、ステンレス治具での測定結果と力学モデルの比較を図2に示す。力学モデルから予想される周波数特性の通り、3つの共振ピークと1つの反共振をもつ特性が得られた。詳しくは論文執筆中であるため他の材質での測定結果は本報告書では省略するが、いずれの材質でも力学モデルと合致する周波数特性が得られており、かつ材質の柔らかさ(ヤング率)に依存して周波数特性の共振ピークがシフトする様子も見られた。従って力学モデルの妥当性が確認されたとともに、接触剛性が周波数特性に及ぼす影響について力学的な理解を深めた。主要な結果については各国の計量標準機関が集まる国際会議にて発表し反応を得た。

力学モデルとの合致が確認されたことで、共振ピークから接触剛性を推定することが原理的には可能であることが示唆された。一方、実際の計測を模したランダム加振実験では、加速度センサの力学特性の反作用のため、出力信号のスペクトルとセンサ感度の周波数特性とでピーク周波数にずれが生じることが分かった。そのため同手法での接触剛性推定は、実用上は計測対象物の剛性や重量に影響され、十分な精度での推定が難しい可能性があることが分かった。

そこで研究目的の一つである接触剛性の推定に関しては方策を変更し、加速度センサの取付対象の材質をもとに推定する手法の可能性を探った。前述の異なる材質での周波数特性測定結果から、接触剛性を表すパラメータとヤング率の関係を調べたところ、滑らかな曲線上にあることが見出された(これも論文執筆中のため本報告書では省略)。従って測定対象の材質(ヤング率)が事前に分かれば接触剛性の大きさを推定することができ、別途測定した特定条件下での周波数特性のデータと組み合わせることで、25 kHz以下での感度を推定できる展望が得られた。

計量標準の観点では、接触剛性によるセンサ感度の変化を測定対象物のヤング率と関連付けて定量的に理解できたことにより、同帯域での振動計測の不確かさの度合いについても知見が得られたことになる。この知見は、今後の高周波振動計測に関する計量標準の整備にも役立つことが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hideaki Nozato, Tomofumi Shimoda
2. 発表標題 CCAUV pilot comparison of single-ended accelerometer (without dummy mass)
3. 学会等名 13th CCAUV meeting (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------