

精密リサージュ図形描画に適した高精度振動センサーの開発と機械の状態診断への適用



瀧谷 俊夫 ①
畠 圭祐 ②
吉誠 龍太 ③
佐藤 健太 ④
轟原 正義 ⑤
吉川 泰史 ⑥
大戸 正之 ⑥

要旨

当社とセイコーエプソン株式会社は、水晶双音叉型振動子を活用した周波数変化型の3次元振動センサーとそれに基づく機械診断技術を共同開発した。この開発に用いた基本技術は、セイコーエプソンが古くから培ってきたQMEMS技術とデジタルIPコア技術であり、従来のサイズモ系サーボ式や静電容量型をしのぐ高分解能、低ノイズ密度、広帯域性能が得られている。本開発では、機械要素の3次元運動を対象として、直交XYZ軸の3方向にそれぞれ単軸の加速度センサーを配置することによって3次元振動センサーを構成し、これが回転機械の振動測定に対して十分な3軸同期精度を有することを確認した。

近年、産業機械や社会インフラの設備保全に対して、状態診断に基づく予知保全が低コストで効果的であるため注目されている。そこで、開発した3次元振動センサーを用い、例として回転機械の軸振動について3次元リサージュ図形による表現法を考案し、その状態診断への適用可能性を検証した。その結果、本振動センサーは3次元リサージュ図形を描画するために十分な性能を保持しており、適切な前処理を施すことによって機械の基本的な振動成分をリサージュ図形として描けることを確認した。さらに、この振動センサーを用いて実際に回転機械の振動を測定したところ、リサージュ図形の観測から機械の経年変化を捉えられる可能性が見出された。今後はこのようなデータを蓄積し、カナデビア株式会社が別途開発している故障予知機能を有する状態管理・診断システムを充実させるとともに、この3軸振動センサーを同システムに実装していく計画である。

なお、本報の開発内容に対して、2023年度の日本機械学会賞（技術賞）を受賞している。

キーワード

振動計測、振動解析、加速度センサー、振動センサー、リサージュ図形、状態診断、予知保全

1. 緒 言

従来、振動計測に頻繁に使われる加速度センサーとして、錘を弾性ヒンジで支持した振り子、ムービングコイル、及び、サーボアンプから構成されるサイズモ系サーボ式加速度センサーがある（図1¹⁾）。センサーメーカーのカタログによると、分解能は $1\mu\text{G}/\text{LSB}$ 、ノイズ密度は $0.2\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の性能が実現されている²⁾。しかし、この型のセンサーは構造上大型となり、単軸の加速度計測に限定されてしまう。これに対して、図2に示すように、振り子の代わりにMEMS技術で作製したポリシリコン製の梁構造体を利用し、その弾性変形による変位を電極型差動キャパシターで検出することに

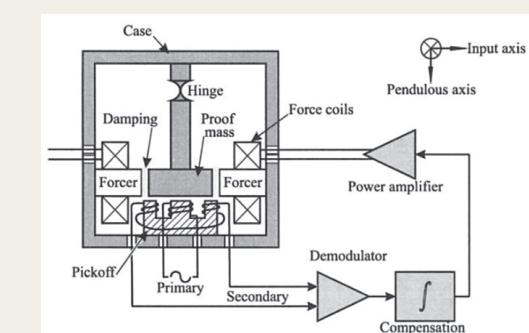
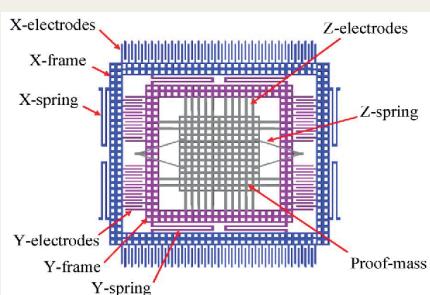


図1 サイズモ系サーボ式加速度センサー¹⁾

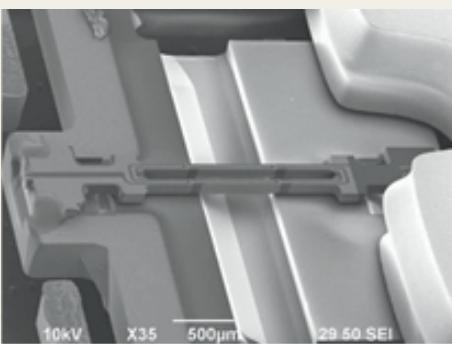
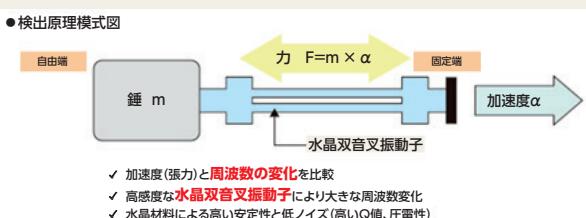
よって、コンパクトな静電容量型加速度センサーを実用化した例は多数見られる³⁾。図2は2軸分（xy軸）のセンサーを表しているように見えるが、紙面に直角方向（z軸方向）にもばね機構を加えて3軸センサーを構成する例を示している。しかし、この種のセンサーにおいて低雑音性、高分解能を追求するには、nm レベルの形状を精密に制御することが計測プロセス及び製

① 機械・インフラ事業本部 開発センター 博士(工学), 技術士(応用理学部門)
② 機械・インフラ事業本部 開発センター
③ 機械・インフラ事業本部 開発センター 技術士(機械部門)
④ セイコーエプソン株式会社 IJS事業部 IJS開発設計部
⑤ セイコーエプソン株式会社 マイクロデバイス事業部 MD商品開発部 博士(工学)
⑥ セイコーエプソン株式会社 マイクロデバイス事業部 MD商品開発部

図2 3軸静電容量型加速度センサー³⁾

作時の実装において要求されるが、通常の技術レベルでは、分解能は数 $\mu\text{G}/\text{LSB}$ 、ノイズ密度は $20\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の性能に留まっているのが現状である⁴⁾。

そこで、セイコーエプソンは世界初のクオーツ時計以来培ってきた水晶技術とMEMS技術を駆使して周波数変化式加速度センサーを開発した。この加速度センサーはQ値の高い（共振ピークの鋭い）単結晶水晶から水晶双音叉振動子を製作し（図3）⁵⁾、錘に作用する加速度によって生ずる張力を共振周波数の変化として高感度に捉える形式のセンサーである（図4）⁶⁾。

図3 QMEMS技術による水晶双音叉振動子⁵⁾図4 水晶双音叉振動子を用いた周波数変化式加速度センサー⁶⁾

一般に、水晶双音叉振動子を小型化するとCI値（Cristal Impedance、水晶の振動損失の目安）が大きくなり、良好な発振特性を得にくく。この小型化の限界を克服するために、振動子の電極面積を拡張する必要があったが、これを実現した技術は半導体微細加工を応用した特殊な3次元フォトリソ加工技術であり、QMEMS技術と呼ばれてセイコーエプソンの登録商標にもなっている。さらに、産業用センサー専用に開発したSoC（System on Chip）により、必要な周辺装置の数、及び、センサー自体の消費電力を大幅に削減し、低ノイズ・高分解能・ワイドダイナミックレンジ・高安定という高性能を維持

しつつ小型で高精度な加速度センサーを実現した（以下、本報では、加速度、並びに、振動速度・振幅の測定をも含めた総称として振動センサーと記す）。直交するXYZ方向にこの振動センサー3台を配置して3軸デジタル振動センサーを構成し、性能確認と精密リサージュ描画を実施したので、以下に紹介する。

2. 振動センサーの性能

一般に振動解析では、大きく分けて、時間領域、周波数領域、及び、空間領域の3種類の信号処理に基づいて行われる。ここでは、空間領域における信号処理を適切に行うこと目的に、各座標軸における位相差に着目する。これまで、位相差に基づくリサージュ解析は診断技術としてあまり普及していないが、その原因として以下の項目の不十分さによって精密なリサージュ图形描画が難しいためと考えられる。

- (1) 検出分解能
- (2) ダイナミックレンジ
- (3) 信号処理速度
- (4) 3軸同期精度

これら4つの項目に対して、前節で述べた水晶双音叉振動子を周波数変化型トランスデューサとして機能させることにより、静電容量型では不可能な高分解能を実現した。このトランスデューサを24bitの分解能を有するA/Dコンバータを含む独自のデジタル計測IPコア⁷⁾と組み合わせることによって、高分解能なセンシングを高安定なワイドダイナミックレンジとリアルタイムに耐えうる高速度処理の条件下で実現している。一般的の機械振動の場合、数mGの測定ができるれば十分解析に耐えうるデータが取得できると考えるが、本センサーにおいては、分解能 $0.06\mu\text{G}/\text{LSB}$ 、及び、平均ノイズ密度 $0.2\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ が得られている。これは、1kHz帯域でのノイズレベルが $6.32\mu\text{G}$ に相当し、弱い高調波でも捉えられる感度を有することになる。

今回開発した3軸デジタル振動センサーでは、同じ特性を持つ单軸振動センサー3台をXYZ方向に配して基板実装し、デジタル処理を行う構成により3軸データ取得における優れた同期精度（ $10\mu\text{s}$ 以下）を達成した。同様に本センサーの帯域が1kHzであり、サンプリング周波数を3kHzに設定した場合でも、3軸同期精度 $10\mu\text{s}$ 以下が得られていることから、リサージュ图形を描画するのに十分な同期性能を有していることが実証された。以上で述べた機能をW20 mm×D50 mm×H16 mmのサイズで実現し、レンジ切換や校正作業も不要となった。また、アナログ配線の取り回しを最小化する工夫により、誘導ノイズなどの影響を受けにくいことも特長である。

データ出力については、ISO10816/20816に準じた

速度出力モード、もしくは変位出力モードを選択し、生データ、RMS（実効値）もしくはPeak to Peak値を出力することができる。図5に示すように、IP67相当の防水性と防塵性を満たすユニットタイプ（Unit Type）と、組込タイプ（Built-in Type）の2機種の外装を想定しており、様々な利用場面での運用が可能である。また、図6に示すように、ユニットタイプの場合は、汎用のRS422とHUBを兼ねたI/F Converterを組み合わせることで複数台同時計測も容易に実現され、USBによってPCにデータを送信することができる。一方、組み込みタイプの場合は通信にUART（Universal Receiver/Transmitter）を用いているが、通信距離の延長や複数台計測対応を考慮し、PoE（Power over Ethernet）に変換した上でPoE HUBを通し、最終的にLANによってPCと接続することで通信が可能である。なお、データ通信にはUART端子だけではなくSPI（Serial Peripheral Interface）端子を備えており、状況によって使い分けることができる。本センサーで取得した振動データは、どちらのタイプでもPCにインストールした専用ロガーソフトにより記憶できる。



図5 振動センサーの外観（ユニットタイプと組み込みタイプ）

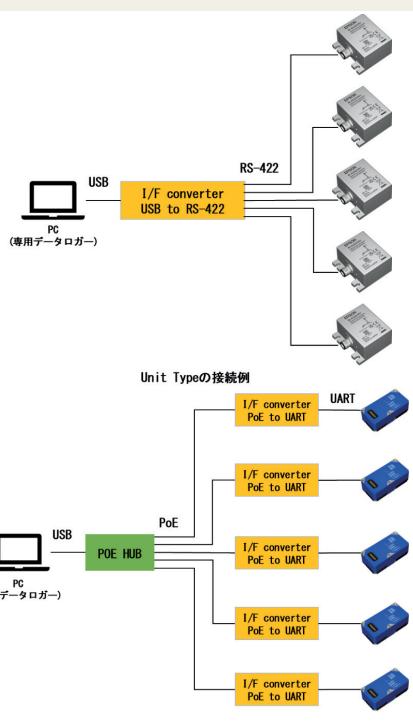


図6 複数台同時計測システム

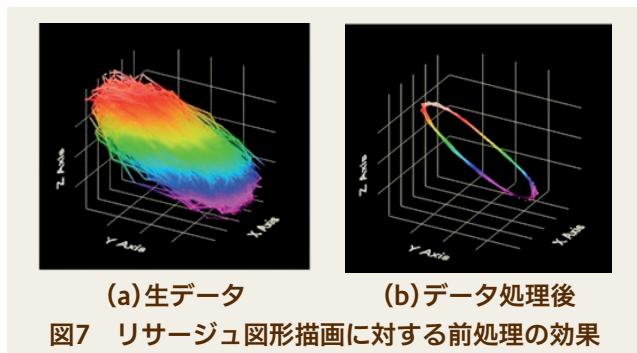
3. 精密リサージュ描画の応用

本研究グループは、開発した振動センサーを用いて機械装置や構造物の振動を測定し、生産現場や社会インフラの保全活動に役立てたいと考えた。製造業の工場では安定した品質や生産性を保つために、生産活動を支える機械や設備の点検・修理などを行う活動が必要になる。一方、国内では高度成長期に整備された橋梁やトンネルなどの社会インフラの老朽化が社会問題となってきており、その安全性向上の必要性が高まっている。これらを背景に、世間ではAIやIoTの発展に伴って故障予知に基づく設備保全技術である予知保全（CBM、Condition Based Maintenance）が作業負荷の低減や管理コストの削減という観点から効率の良い方法として注目されている。従来行われてきた事後保全や定期保全に代わって、今後保全方式が予知保全へと移行していくためには、データに裏づけられた状態監視・診断技術の確立と、それに基づいた広範な機器に対するきめ細かい監視・診断を実行できることが前提となる。カナデビアにおいても、ごみ焼却場の飛灰搬送コンベアを維持管理する目的で機器の発する振動をモニタリングしたり⁸⁾、誘引送風機については振動を中心とした温度、磁界等複数種のデータを取り込み分析するスマートセンサーを用いて、異常検知システムを構築している開発例がある⁹⁾。

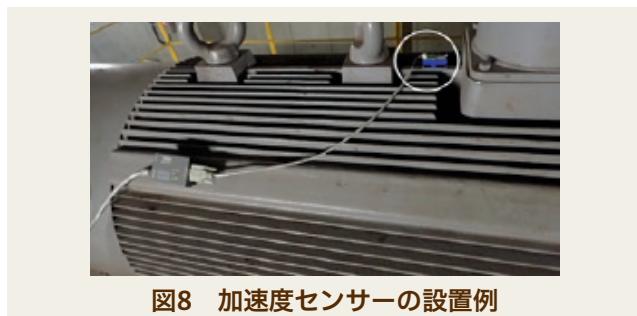
ところで、すでに述べたように、振動計測により得られたデータの解析手法は、時間領域、周波数領域、及び、空間領域の3つの信号処理に大別される。一般には、比較的簡便に解析が可能な時間領域と周波数領域の信号処理が多く用いられ、特に時間領域の信号処理では、振動速度（実効値）の経時変化や確率分布の監視が採用されることが多い、周波数領域の信号処理では振動周波数やピーク値変動の監視が採用されることが多い。しかし、いずれの信号処理法も振動の位相情報が含まれないこと、及び、単発的に発生するうなりや周波数ピーク変動の情報は統計処理によって消失すること等の理由から、これらは装置の振動状態の一側面のみを測定する手法に留まっている。したがって、これらの振動波形から機械装置の異常を読み取ることは難しく、波形に一定の処理を施して解析結果を考察するには専門的な知識が必要となり、汎用的な方法としては確立していない。これに対して我々の手法は、空間領域の信号処理法の一種である3軸振動データを用いたリサージュ図形解析であり、時間領域及び周波数領域の信号処理の解析法と比較して、回転機械におけるミスマライメントやアンバランス等空間上の動的状態を装置の異常や故障と相関づけられて、より明確に異常を捉えることができると考える。

以上の仮説の下、リサージュ图形の描画が可能か否かを確認するために、開発した振動センサーを用いて実験室の小型モーターの回転軸の振動を測定した。その結果、振動センサーの分解能が高すぎるためランダムノイズを拾い、分析するには非常に複雑なリサージュ图形が得られた。そこで、FFTの区間加算方式でランダムノイズ成分をキャンセルし、本質的な振動成分だけを抽出する方法を考案した。詳細は文献5)に譲るが、この方法では、基本波の周波数や分割区間をより正確に決定する必要が生じ、同期性も含めて元データを非常に精度良く取得しなければ実現できないが、ここで開発した振動センサーならその実現が可能となり、実力が発揮されたものと考えている。

次に、この方法で振動データを前処理することによって、精密なリサージュ图形を描画することに成功した例を示す。図7は上述した小型モーターにおいて、同じ振動データのリサージュ图形を前処理の前後で比較したものであるが、前処理の実施によって精密なリサージュ图形の描画に成功したことが確認できる。この例では、処理前にはランダムノイズが重畠されていたものの、運動の基本振動数がXYZの3軸方向とも正確に同じであることが測定データとして取得できたために、処理後には単一の橿円軌道が現われている。



次に、ある工場設備で実際に稼働している電動機に開発した振動センサーによる計測とリサージュ图形描画を適用した例を示す。組込タイプの振動センサーを電動機のケース上部に設置した様子を図8に示すが、磁石を用いた治具により容易にこのような設置が可能である。この例では、センサーX軸を電動機の回転軸方向、センサーY軸を回転軸と直角の水平方向、センサーZ軸を鉛直方向となるように設置している。



計測で得られた振動データに対して、前処理アルゴリズムを適用し精密リサージュ图形描画を行った例を図9(a)に示す。リサージュ图形では、90度ずつ対称的に配置された橿円状の輪が4つと比較的大きな橿円状の輪が1つ見られる。このような特徴的な形状は、各軸の振動振幅、周期、及び、位相の違い、さらに高調波の存在に起因して作られている。また、長期間に渡ってリサージュ图形を観測したところ、リサージュ形状が電動機の稼働時間とともに変化していくことがわかった(図9(b)(c))。一方で、形状変化を指標化する試みも進めており、従来のRMS(実効値)やPeak to Peakの監視では捉えられない電動機の経年劣化による振動状態の変化を掴むことが可能となった。詳細は文献10)を参照されたい。このように、新しいセンサーと新しい統計処理手法を採用したリサージュ图形解析が、旧来の振動波形データ処理方法では得られない、故障予知や経年劣化を明確に捉えられる指標となりうることを示唆している。

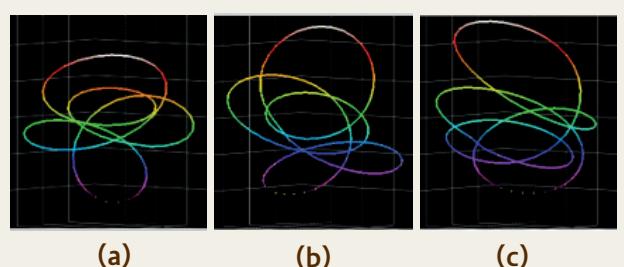


図9 電動機回転軸振動のリサージュ图形
計測時期 (a)2020年8月, (b)2021年9月, (c)2021年12月

4. 状態診断の指標

前節でも少し述べているが、ここでは、機械の状態診断の指標として可能性が高い例をひとつ紹介する。我々はすでに、精密リサージュ图形に考察を加え、回転機械の振動軌跡がある特定の平面上に描かれることを経験的に見出し、この平面における法線の振動の大きさが機械の劣化診断に利用できると考えている¹⁰⁾。

即ち、3軸振動センサーに固有の(x, y, z)空間座標において、ある平面

$$ax + by + cz + d = 0 \dots\dots\dots (1)$$

が存在し、振動軌跡はこの平面上で二次元的な挙動を示す。言い換えると、簡単のため振動は調和的であると仮定した場合、各軸の振動は次のように表される。

$$\begin{cases} x = A_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ y = A_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2) \\ z = A_3 \sin(\omega_3 t + \phi_3) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

振動軌跡が式(1)の平面上で描かれるということは、例えば空間座標(x, y, z)に対して何らかの回転・平行移動によって座標変換され、振動は式(1)の平面に一致する新たな座標(x', y', z')におけるx'y'平面上で、

$$\begin{cases} x' = A'_1 \sin(\omega'_1 t + \phi'_1) \\ y' = A'_2 \sin(\omega'_2 t + \phi'_2) \\ z' = 0 \end{cases} \dots \quad (3)$$

のように表される。以上の座標変換のプロセスにおいて、当然ながら、式(2)において、 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ であれば線形変換によって式(3)が導かれる。ここに測定誤差が数%生じ、各軸の振動数が正確に一致しなければリサージュ図形が単一の橈円形状から逸脱してしまうことは、実際に描画してみれば容易に理解できる。

当面は、式(1)の法線ベクトル(a, b, c)の向きが運転条件や環境条件というよりは機械要素のアライメント等の幾何学的関係に依存して決まり、その向きにはある一定の摂動が含まれている事実に着目する¹⁰⁾。この摂動の大きさが機械の劣化といかに関連するかは今後の課題であり、現在、別の実験において、回転機械のミスマライメントに基づく現象が特徴的に表れるリサージュ図形を詳細に分析し究明しているところである。従来の技術では、リサージュ図形が精度良く得られなかっただけに、回転機械の状態診断に適用された例が少なかったと思われるが、それはリサージュ図形描画に適したセンサーが存在しなかったためではないだろうか。たとえデータをAIに解析させたとしても、実験から得られるデータの細部に渡って正確な情報量がなければ詳細な現象の発見には至らない。現象の陰に隠れた本質を見破っていくためには、正確な情報量を提供する高精度なセンサーが必要であり、そのようなセンサーをいかに開発するか、ということが今後ますます重要になってくると思われる。

5. 結 言

セイコーエプソンは、3軸デジタル加速度センサー M-A552AR (Unit Type)、M-A352AD (Built-in Type)、3軸振動センサー (振動速度・振幅測定用) M-A542VR (Unit Type)、M-A342VD (Built-in Type) を製品化している。

現在、M-A552AR、M-A342VDは、カナデビアにおいて、工場設備のファン・ポンプ駆動用モーター、ダム・水門ゲート駆動用モーター等の振動監視を中心に採用が進んでいる。また、そのような実施例の現場においては、本研究で開発した精密リサージュ図形解析を含めた指標化の方法を、状態管理・診断システムとして取り入れ、より広く実用に供するよう具体的な検討を始めている。今後は前述した用途への適用事例を増やしつつ、他用途へも適用範囲を広げ、振動センサーを含む状態管理・診断システムの普及を進めると共に社会基盤の維持管理に貢献したいと考えている。

参考文献

- 1) Lawrence, A. (1998). The Pendulous Accelerometer. In: Modern Inertial Technology. Mechanical Engineering Series. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1734-3_5
- 2) 東京計器株式会社, 高性能サーボ加速度計TA-25K https://www.tokyokeiki.jp/Portals/0/images/products/pdf/construction/ta-25k_201409.pdf
- 3) Chih-Ming Sun; Ming-Han Tsai; Yu-Chia Liu; Weileun Fang, Implementation of a Monolithic Single Proof-Mass Tri-Axis Accelerometer Using CMOS-MEMS Technique, IEEE Transaction on Electron Devices, 57-7, 1670-1679, 2010, DOI: 10.1109/TED.2010.2048791.
- 4) Analog Devices ADXL354/ADXL355 データシート <https://www.analog.com/jp/products/adxl354.html#product-evaluationkit>
- 5) 佐藤・轟原・吉川・大戸・瀧谷・北村；機械振動の精密リサージュ図形描画を用いた装置診断解析に関する研究, 日本機械学会2021年度 年次大会 講演論文
- 6) 丸文株式会社 加速度センサーの基本と原理. <https://www.marubun.co.jp/products/4619/>
- 7) Todorokihara, M., A 9 ps DNL/INL/RMS FPGA-Based Sigma Accumulation TDC with Unlimited Dynamic Range for Time-Based Analog Front End Applications, IEEE Sensors, 2021.
- 8) 新佑・戴・林・大西；周波数解析手法を用いた飛灰搬送コンベアの予知保全について, 第35回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2024.
- 9) 赤塚・長野；完全自動診断機能付きスマートセンサによる回転機突発故障回避事例の報告, 第45回全国都市清掃研究・事例発表会, 2024.
- 10) 佐藤・轟原・吉川・大戸・瀧谷・北村；振動の精密リサージュ図形描画アルゴリズムとこれを用いた状態監視/装置診断の指標化に関する研究, 日本機械学会2023年度 年次大会 講演論文.

※Webサイトは2024年11月1日時点での参照し、存在することを確認している

用語解説

ノイズ密度 ($\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$)

測定値に含まれるノイズに関する指標であり、単位帯域幅あたりの加速度ノイズ振幅に対応する。パワースペクトル密度の平方根の次元を持つ。

水晶双音叉振動子

両端で固定結合された2つのビームからなる水晶振動子。2つのU字型音叉をその開口端同士で接合した形状であるこ

とから「双音叉」と称される。

QMEMS

Quartz Micro Electro Mechanical Systemsの略称。水晶を表すQUARTZと、微細加工技術の1つであるMEMSを組み合わせた造語。水晶素子にフォトリソグラフィー技術を基本とする精密な微細加工技術を施して、水晶素子を製造する技術。小型化しても、周波数の高い精度や高い性能、高い信頼性を実現できる。

SoC (System on Chip)

動作に必要な複数の機能ブロックを集約し、連携して一つのシステムとして機能するよう設計された集積回路製品。

デジタル計測IPコア

当該周波数変化式トランステューサのアナログフロントエンドはデジタル回路で構成されている。アナログ回路を用いないことから「デジタル計測IPコア」と称しており、基準クロック周波数とトランステューサ出力周波数との比に対応する1次 $\Delta\Sigma$ 変調信号を得る独自のアルゴリズムを採用している。

ISO10816/20816

ISO（国際標準化機構）により作成された、回転機械および非回転機械で測定される機械振動の測定および評価に関する一般的なガイドラインを含む基本文書。

IP67（ユニットタイプのみ）

IEC（国際電気標準会議）およびJIS（日本工業規格）で定められている、電気機器内への異物の侵入に対する

保護の程度に関する等級をコード化したもの。「IP」は International Protectionの略。第一特性数字は固体物に対する保護等級であり、「6」は粉塵が中に入らない耐塵形であることの表示。第二特性数字は水に対する保護等級であり、「7」は一時的に一定水圧の条件に水没しても内部に浸水することがない防浸形であることの表示。

RS422

EIA（電子工業会）により制定された、電子機器間でデータ通信を行うためのシリアル通信規格の一つ。ノイズに強く比較的長距離／高速通信が可能。

PoE（ピーオーワイ）

Power over Ethernetの略語であり、IEEE 802.3afおよび802.3atで定義されるイーサネットの規格。LANケーブルを経由して、データ通信と同時に電力を供給することが可能。

UART

Universal Asynchronous Receiver/Transmitterの略語であり、2本のラインを使用する非同期式シリアル通信の規格を指す。

文責者

カナデビア株式会社 機械・インフラ事業本部
開発センター
瀧谷俊夫
Tel: 080-6111-6211
E-mail: takiya@kanadevia.com

Development of High-Precision Vibration Sensor Suitable for Precise Lissajous Figure Drawing and its Application to Machine Condition Diagnoses

Abstract

Kanadevia Corporation and Seiko Epson Corporation have developed a frequency-changing vibration sensor with an internal twin diapason-type oscillator based on Seiko Epson's QMEMS and digital IP core technology. It achieved high resolution, low noise density, and wide bandwidth performance that surpass the conventional seismic servo-based and capacitive types. In order to use the vibration sensor for three-dimensional dynamic analysis of machines, we arranged its single axis sensors in three directions along the orthogonal XYZ axes and confirmed it offered sufficient accuracy in three-axis synchronization for ordinary rotating machines.

Predictive maintenance methods based on condition diagnosis are increasingly recognized as low cost and effective methods for maintaining industrial machinery and social infrastructure. Therefore, we used the three-dimensional vibration sensor thus developed to devise a method of expressing the shaft vibration of rotating machine, as an example, as a three-dimensional Lissajous figure, and explored its applicability to condition diagnosis. Our results confirm that this vibration sensor has sufficient performance to draw three-dimensional Lissajous figures, and that the basic vibration components of the machine could be drawn as Lissajous figures by applying appropriate pre-processing. Furthermore, when this vibration sensor was used to measure the vibration of actual rotating machinery, it was possible to detect changes due to aging in this machinery. In the future, we plan to compile more data and use the sensor as a failure prognosis function in comprehensive diagnostic systems being developed separately at Kanadevia Corporation.

Authors

Toshio Takiya (Kanadevia Corporation, E-mail: takiya@kanadevia.com)

Keisuke Hata Ryota Yoshiki (Seiko Epson Corporation) Kenta Sato
Masayoshi Todorokihara Yasushi Yoshikawa Masayuki Oto