

高精度振動センサの開発と精密リサージュ図形描画に基づく 状態監視/診断技術への応用

Application to Machine Condition Diagnosis Technique Based on Development of High Precision Vibration Sensor and Precise Lissajous Diagrams

○正 佐藤健太 (セイコーエプソン), 轟原正義 (セイコーエプソン),
吉川泰史 (セイコーエプソン), 大戸正之 (セイコーエプソン)
正 瀧谷俊夫 (日立造船), 北村暁晴 (日立造船)
SATO Kenta¹, TODOROKIHARA Masayoshi², YOSHIKAWA Yasushi², OTO Masayuki²,
TAKIYA Toshio³ and KITAMURA Takaharu³

1 Seiko Epson Corporation, Nakanoshima, Kita-ku, Osaka 530-6122, Japan

2 Seiko Epson Corporation, Fujimi-machi, Suwa-gun, Nagano 399-0293, Japan

3 Hitachi Zosen Corporation, Funa-machi, Taisho-ku, Osaka 551-0022, Japan

Keywords: Machine Condition Diagnosis Technique, Vibration Sensor, Lissajous Diagrams, Vibration Velocity

昨今の人手不足や生産性向上の要求を背景として、装置診断技術 (Machine Condition Diagnosis Technique) の要望が高まっている。近年の装置診断技術においては、振動速度 (実効値) の経時変化の監視や、周波数解析による振動周波数やピーク値変動の監視が主流となっているが、これらの測定には XYZ 軸の位相情報や短時間の変化情報が含まれないため、装置の振動状態の一側面のみを測定する手法となっている。

これに対し、3 軸振動計測を行うことで 3 次元空間における機械振動そのものをリサージュ図形により可視化する手法もあるが、計測データの 3 軸同期方法、背景雑音のリサージュ図形描画への影響の低減、3 軸振動センサ設置時の調整作業等に課題があり、普及していないのが現状である。

上記課題に対し、リサージュ図形を用いた装置診断技術の開発を目的として、3 軸一体のデジタル振動センサの試作と、精密なリサージュ図形描画のための前処理アルゴリズムの検討を行った。ハードとソフト両面を一体とした検討により、計測系の簡素化と機械振動の精密な可視化の両立が可能となった。本手法を適用することで、時間領域や周波数領域の信号処理では困難であった、振動の対称性の変化を簡便に可視化することができる。本発表では試作した機械振動計測向け 3 軸デジタル振動センサおよび考案した精密リサージュ図形描画のための前処理アルゴリズムを説明し、これらを用いた機械振動計測例を紹介する。

1 緒 言

装置診断技術は、性能、機械、電気、潤滑油などの状態を監視する手法であるが、振動計測を用いた装置診断技術は非破壊で稼働状態を監視できるため、その適用範囲は広い¹⁾。そのため、振動計測を用いた装置診断技術の研究は盛んであり、数多くの解析手法が提案されている。振動計測により得られたデータの解析手法は、(a) 時間領域の信号処理、(b) 周波数領域の信号処理、(c) 空間領域の信号処理、の 3 つに大別される²⁾。

近年の装置診断技術においては、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主流であり、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主流となっている。

しかしながら、これら測定には振動の位相情報が含まれないこと、突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、装置の振動状態の一側面のみを測定する手法となっている。装置の多種多様な異常や故障を検出し対策するためには、これら信号処理手法に加えて、振動状態を多面的に捉えることのできる手法が望まれている。

これに対し、空間領域の信号処理に大別される 3 軸振動データを用いたリサージュ図形 (またはオービット図形) 解析は、上記時間領域の信号処理及び周波数領域の信号処理の解析法と比較し装置の異常や故障との相関をより明確に捉えられるという特徴がある³⁾。しかしながら、リサージュ図形を得るための 3 次元振動データを簡便に取得することが難しく、普及していないのが現状である。その背景として以下の課題が挙げられる。

- (1) 計測データの 3 軸同期方法
- (2) 背景雑音のリサージュ図形描画への影響の低減
- (3) 3 軸振動センサ設置時の調整作業

上記課題に対し我々は、空間領域の信号処理を簡便に行える装置診断技術の構築を目的とし、振動センサおよび解析手法のハード・ソフト両面からの検討を行った。本発表では、試作した機械振動計測向け 3 軸デジタル振動センサおよび考案した精密リサージュ図形描画のための前処理アルゴリズムを説明し、これらを用いた機械振動計測例を紹介する。

2 振動センサおよび前処理アルゴリズム

2.1 3軸デジタル振動センサの試作

今回試作した3軸デジタル振動センサ（開発名称:A342）には、水晶を用いた周波数変化型トランスデューサを採用した。内部構造を Fig.1 に示す。狭幅と薄厚の双音叉振動子を2端でカンチレバーと結合させ、カンチレバーの変形を圧縮力または引張力として伝えることで双音叉振動子の共振周波数を変化させる。カンチレバーと双音叉振動子は水晶で形成し、熱膨張係数を揃えた。

0.2 cc のセラミックパッケージに真空封止した1軸振動センサ3つをXYZ方向に配して基板実装し、27bit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⁴⁾と組み合わせることで、高安定でハイダイナミックレンジな3軸デジタル振動センサをW20mm*D50mm*H16mmのサイズで実現した。同じ特性を持つ1軸振動センサを3軸実装しデジタル信号処理を行う構成により、3軸データ取得時における優れた同期精度（10 μ s以下）を達成した。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という特長がある。このような低雑音、高分解能と優れた同期精度により、精密なリサージュ図形描画を担保する。

試作した振動センサはデジタル出力であり、フィルタやA/Dコンバータ等のゲイン調整を含む校正作業は出荷時に対応済である。振動センサの出力モードとして、ISO10816/20816に準じた速度もしくは、変位を選択することができ、出力データとして生データ、実効値もしくはPeak to Peak値を選択することができる。振動センサの外装は Fig.2 に示すように、組込タイプとIP67の防水防塵を満たすユニ

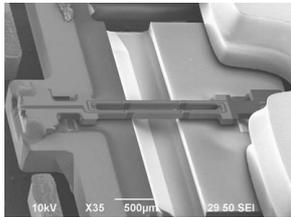


Fig.1 X'tal Resonator and Cantilever.



Fig.2 Sensor unit packaging.

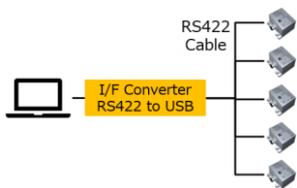


Fig.3 Diagram of measurement system.

ットタイプの2機種を用意しており、様々な利用シーンでの使用に対応できる。複数台計測では Fig.3 に示すようにRS422, PoE ケーブルや HUB と組み合わせることで容易に実現でき、5 台同時計測で問題なく動作することを確認済みである。なお、センサの構造共振周波数が 4500 Hz 付近となるよう設計することで、10 Hz~1000 Hz の使用帯域におけるフラットな周波数応答特性を実現している。

2.2 精密リサージュ図形描画のためのデータ前処理アルゴリズム

3 軸振動センサのリサージュ図形描画を未処理の状態で行うと、装置以外に起因する振動（以降、背景雑音）の影響を受けるため、対象である機械振動の状態を抽出することは難しい。背景雑音を低減し、対象とする機械振動に同期した信号を抽出するために、以下の前処理アルゴリズムを考案した。

1. 時系列データ取得
2. FFT 処理
3. FFT 最大ピークに対応する周期の算出
4. 周期に基づく時系列データの分割
5. 分割した時系列データの平均化

FFT 最大ピークに基づく周期により分割した速度時系列データの例を Fig.4 に、分割した速度時系列データおよび平均化データを Fig.5 に示す。Fig.4 および Fig.5 より、時系列データに含まれる繰り返し信号が上記前処理アルゴリズムにより同期して平均化されることが直感的に理解できる。以下では、数式を用いて前処理アルゴリズムを説明する。

まず、サンプリング周期 T_s で得られた時系列データから対象とする M 個の時系列データ ($V_1, V_2, V_3 \dots V_M$) を取得し FFT 処理を行う。FFT 最大ピークに対応する周期を算出し、これをデータ分割周期 T_v とする。データ分割周期 T_v の m 倍をサンプリング周期 T_s で割った値に最も近い整数を P_m とすると、 P_m は分割された時系列データの先頭データを示すインデックスに相当する。

$$P_m = \left\lfloor \frac{mT_v}{T_s} + 0.5 \right\rfloor \dots (1)$$

分割された時系列データのセット数 N は以下の式で与えられる。

$$N = \left\lfloor \frac{MT_s}{T_v} \right\rfloor \dots (2)$$

分割された時系列データの N セットの同期加算平均である時系列データ L_j は $j=1 \sim [T_v/T_s]$ の範囲で式(3)を計算することで得られる。

$$L_j = \sum_{i=1}^N \frac{V_{P_i+j}}{N} \dots (3)$$

以上の前処理アルゴリズムにより、 T_v / T_s 個のデータ列 L が得られる。これを XYZ 各軸についてそれぞれ計算することにより 3 軸分の時系列データが得られ、これを散布図プロッ

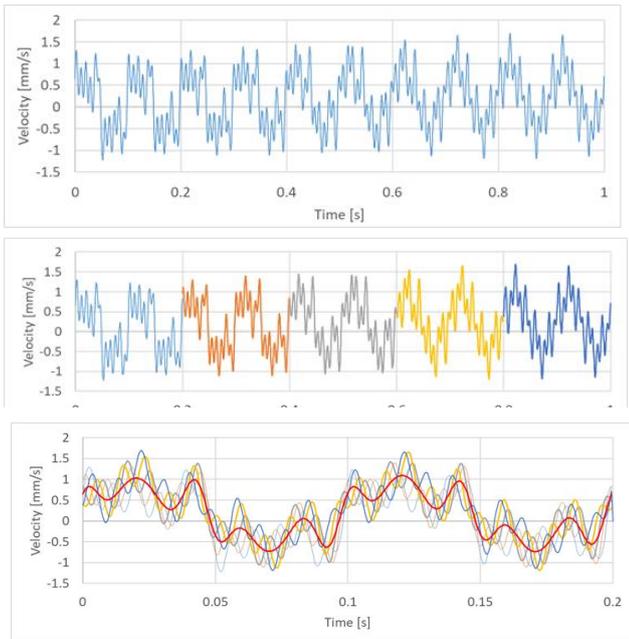


Fig.5 Data averaging.

トすることにより FFT 最大ピークに対応した周波数とその高調波を含んだ成分が抽出されたリサージュ図形を得ることができる。Fig.5 の赤い線が式 (3) の L に対応する。

上記の前処理フローにより、リサージュ図形描画の際のノイズとなる背景雑音を低減し、対象とする機械振動に同期した信号を効果的に抽出することができる。

なお、対象とする機械振動の高調波が FFT 最大ピークとなるケースもあるため、データ分割周期を整数倍にして基本波を含むように設定したり、FFT 処理を行わず、一定値指定したりする等の調整が必要な場合もある。

前処理効果を確認するため、前処理アルゴリズム適用の有無によるリサージュ図形描画の差異を比較した。

電動機の駆動時に生じる振動を計測したデータを基に描画したリサージュ図形を Fig.6 に示す。図左が前処理なし、図右が前処理アルゴリズムを適用した場合のリサージュ図形である。背景雑音や突発的なノイズの影響が低減され、本来の電動機の振動である楕円振動の様子が明瞭に可視化されていることがわかる。

XYZ の 3 軸成分ともに同じ周波数で振動し、高調波が弱い

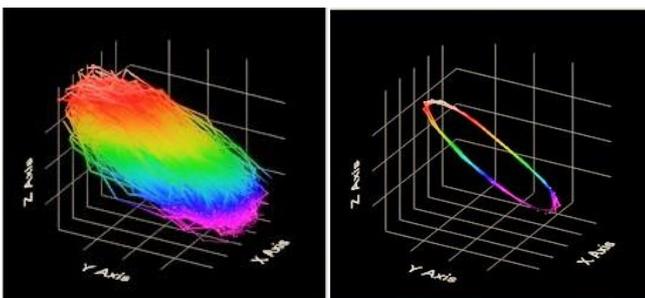


Fig.6 Lissajous diagram. Left: Before treatment
Right: After treatment

場合には、Fig.6 の例のようにリサージュ図形は楕円形となる。高調波が強い場合や FFT ピーク値が変動する場合はリサージュ図形の蛇行や振れとして可視化され、これらが周期的に変化する様子も観測される。

2.3 実測

試作した 3 軸デジタル振動センサにより機械振動計測を行い、考案した前処理アルゴリズムを適用した精密リサージュ図形描画例を紹介する。電動機 A と、稼働時間が電動機 A より長い電動機 B について振動測定を行った。

組込タイプ (Fig.2 右) のセンサを磁石による治具を介して電動機に固定した。振動データの取得のための通信には UART を用いたが、通信距離の延長や複数台計測対応を考慮し PoE に変換し PC と接続した。2500 サンプル毎秒の XYZ 軸の速度データ (Fig.8, Fig.9) と温度データを、PC にインストールした専用ロガーソフトにより取得した。

振動センサを電動機のケース上部に設置した状態を Fig.7 に示す。センサ X 軸を軸方向、センサ Y 軸を左右方向、センサ Z 軸を上下方向となるよう設置した。

電動機 A と電動機 B の振動状態について、ISO 10816-3:2009 に準拠した計測結果による比較を Table.1 に示す。電動機 B の振動速度実効値 (RMS) は、電動機 A と比較し 30 %程度大き



Fig.7 Installation location.

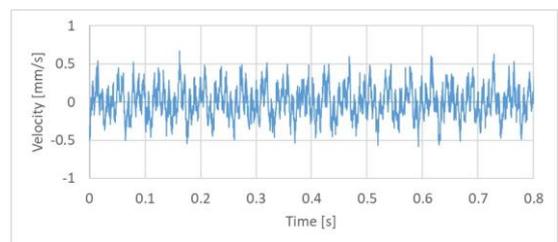


Fig.8 Velocity data for Machine A at Z axis.

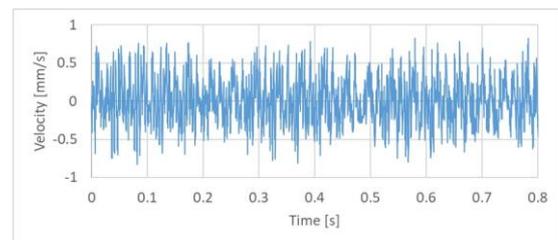


Fig.9 Velocity data for Machine B at Z axis.

Table 1 RMS, Frequency, Temperature data.

| | Machine A | Zone | Machine B | Zone |
|------------------|-----------|------|-----------|------|
| XRMS [mm/s] | 0.29 | A | 0.38 | A |
| YRMS [mm/s] | 0.75 | A | 1.02 | A |
| ZRMS [mm/s] | 0.21 | A | 0.31 | A |
| Frequency [Hz] | 26.6 | - | 24.7 | - |
| Temperature [°C] | 56.4 | - | 58.2 | - |

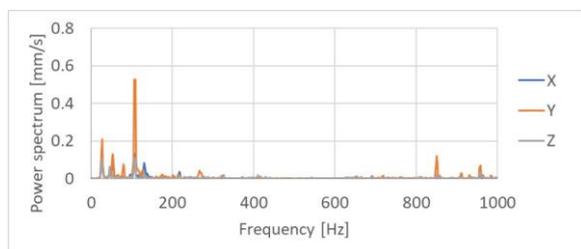


Fig.10 Power spectrum for Machine A.

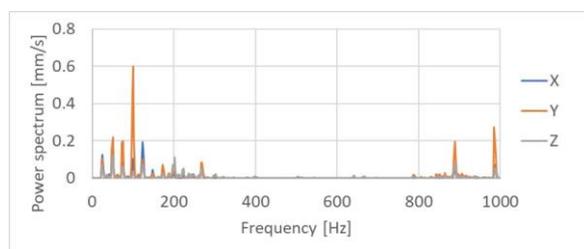


Fig.11 Power spectrum for Machine B.

くなっているが、ISO 10816-3:2009に基づく判定では、3軸いずれも Zone Aに分類される。周波数に関しては1.9 Hzの差があり、温度は電動機Aに比べ電動機Bが1.8℃高かった。

周波数毎のパワースペクトルをFig.10, Fig.11に示す。電動機A, 電動機Bともに100 Hz付近に最大ピークがあるが、これはTable.1に示した電動機の基本振動の4次高調波である。4次の他に、2次, 3次, 5次等の高調波も発生している。

次に、上記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図形描画を行った。電動機Aおよび電動機Bの振動に対応する精密リサージュ図形描画結果をFig.12およびFig.13にそれぞれ示す。

電動機Aの振動に対応するリサージュ図形(Fig.12)では、90度ずつ対称的に配置された楕円状の4つの輪と比較的大きな楕円状の輪が1つ見られた。電動機Bの振動に対応するリサージュ図形(Fig.13)では、輪が4つ確認できるが、電動機Aのリサージュ図形と比較すると、輪の楕円形状は各々変形しており大きさにもばらつきがあり、出現位置の対称性も低かった。電動機Bに比べ稼働時間が短い電動機Aではより対称性の高い振動状態であったと言えるが、この差は稼働時間の差により生じたと推定している。

以上より、Table.1の時間領域の信号処理や、Fig.10, Fig.11の周波数領域の信号処理の指標では捉えることが難しい振動状態の対称性の変化を精密リサージュ図形描画により可視化できることがわかった。

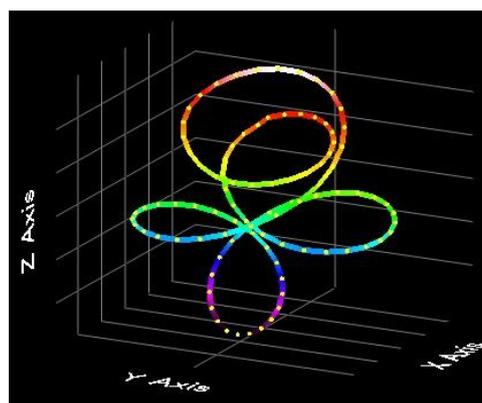


Fig.12 Lissajous diagram for Machine A.

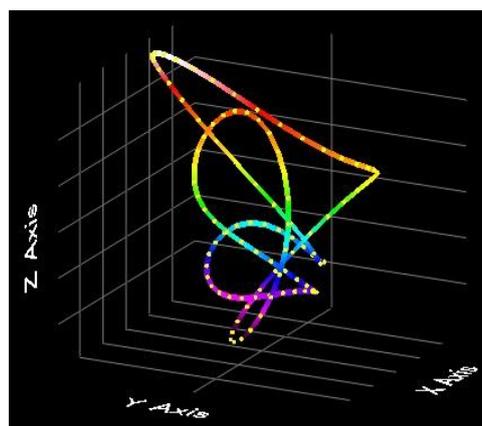


Fig.13 Lissajous diagram for Machine B.

3 結論

装置診断技術の開発を目的として、試作した3軸一体のデジタル振動センサと考案した前処理アルゴリズムを用い、機械振動の精密リサージュ図形描画を行った。

リサージュ図形描画により振動を可視化する際の課題に対し、(1)低雑音、高分解能と優れた同期精度の3軸デジタル振動センサを試作し、(2)背景雑音を低減し対象とする機械振動に同期した信号を抽出する前処理アルゴリズムを考案した。これを組み合わせることで、(3)3軸振動センサ設置時の作業負担を大幅に軽減した。上記工夫によりこれまで時間領域や周波数領域の信号処理では困難であった振動の対称性の変化を簡便に可視化することができる。

今後、本センサおよび本解析手法を用いて様々な機械振動を可視化しデータを蓄積することで、経年劣化や装置異常の状態と対応するリサージュ図形との相関を明らかにし、装置診断手法として発展させていきたい。

参考文献

- [1] ISO 13380 Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines on using performance parameters, 2002.
- [2] 豊田利夫：“安全工学”，P322, 1997.
- [3] 豊田利夫：“回転機械診断の進め方”，日本プラントメンテナンス協会, pp.96, 127.
- [4] M. Todorokihara et al., 2018 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, P9,2018.