

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420077

研究課題名(和文) ジャークセンサによる極低速回転軸受の新しい多事象損傷診断システムの開発

研究課題名(英文) Development of novel multi-purpose diagnosis system for rolling bearings in very low rotation speed using jerk sensor

研究代表者

辺見 信彦 (HENMI, Nobuhiko)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：80256669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：独自に開発したジャークセンサと独自に考案した軸受診断のための信号演算処理方法によって、転がり軸受のための新しい診断法の有効性を示した。内輪、外輪、転動体に傷がある場合のすべてに対して有効であることを示した。実用化を念頭に置いて、実時間処理システムを構築し、システムとしての課題を明確化した。また低コスト化のためのワンチップマイコンによる具体的課題も明らかにし、低速回転から高速回転まで対応可能な、本研究の提案する転がり軸受診断システムの有効性とその実現手法を実証した。

研究成果の概要(英文)：Using originally developed jerk sensor and proposed signal processing method, a novel diagnosis system for rolling bearing is developed and effectiveness of the system is clarified. The proposed method and system are available for all of the failures on inner ring, outer ring and rolling element, i.e. ball or roller. Considering practical and industrial use, a real-time processing system is manufactured. Practical problems of the real-time system are clarified. A one-chip processor system for low-cost system is also investigated and key-points to realize the system are clarified. Eventually, efficiency and realization method for practical system application are shown.

研究分野：精密工学

キーワード：軸受診断 転がり軸受 ジャークセンサ 実時間処理システム

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 回転機械の異常診断において、一般的に振動検出には加速度センサが用いられている。軸の回転数が高い場合や、損傷の度合いが大きい場合には、その損傷を原因とする異常振動の振動レベルが大きいため、比較的簡単に検出と診断ができる。しかしながら回転数が低い場合や損傷の度合いが小さい場合には、その異常振動の振動レベルが小さいため、振動の検出自体が難しいとともに、損傷以外の原因により発生するいわゆるノイズ振動とのS/N比が低下するので、診断が非常に難しい。軸受や鉄鋼材料の生産ラインや圧延機械などでは、軸受に高負荷がかかるためフレーキングなどの損傷が発生しやすいにもかかわらず、数rpmから数10rpm程度の低速回転で軸が回転するため、その損傷度合いを高精度に診断するのは非常に難しい。そのため低速回転機械に対する高感度な振動検出器と、検出した振動信号を用いて高精度に損傷を診断できる実用的診断方法とがともに強く求められている。

(2) 一方、振動モニタ信号を用いた回転機械の異常診断方法の従来法については、例えば確率論的な手法だったり、フィルタリングによる異常振動の弁別とエンベロープ処理などを組み合わせた方法だったり、スペクトルの尖度やカルバック情報量など特殊な解析パラメータにより総合的に評価する方法等、実用化されている技術であっても何れも精度が高い方法とは言い難い。特に低速な回転機械に対応できる診断方法が殆ど全くないと言っても過言ではない。本研究で提案するジャークセンサによる新しい軸受診断法は、パルス状振動検出に対するジャークセンサの優位性を活用するだけでなく、低速回転下における振動検出信号の特殊性に対応するために、独自に考案した新しい診断アルゴリズムによる診断方法であり、低速回転の厳しい状況に対しても有効な方法である。ちなみにジャークとは加速度の時間微分値である。

(3) 本研究では圧電素子を用いたジャークの計測法を独自に開発し、その有効性を検証し公開してきた。ジャークは加速度の微分値であるので、高い周波数成分を含む振動に対しては加速度センサよりも高感度で振動を検出できる。転がり軸受にフレーキングなどの損傷が発生しているとき、軸受の転動体とその傷を通過するたびにパルス状の振動が発生する。そのため損傷に起因する異常振動の検出に対しては加速度センサよりもジャークセンサの方が優位であると考えられ、転がり軸受の損傷診断への応用と着想した。

また、本診断法の演算アルゴリズムは非常に簡単ではあるものの、これまでは処理演算をオフラインで実施してさらに考案した診断法は軸受の外輪のみならず、原理的には内輪や転動体が損傷した場合にも対応できる方法である。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究は数rpm程度で極低速に回転する転がり軸受の損傷の有無を判定するための新しい損傷診断システムを開発することを目的としている。特に本助成によりリアルタイム計測システムの試作と損傷部位の多様性への対応有効性の検証を目的とし、より広範な応用に対する実用化に向けた目処を立てることを目指す。

(2) 具体的には信号処理のリアルタイム化と実証範囲の拡大である。信号処理のリアルタイム化については、まずはDSPボードとパソコンによる実システムを構築し、つぎに処理方法の簡略化の可能性を検討する。その検討の結果を活用し、最終的にはワンチップマイコンとジャークセンサによる小型診断システムの実現性について問題点を明らかにする。

(3) 実証範囲の拡大については、まずは外輪に複数の損傷を設けた場合の信号検出と診断の有効性、および問題点を明らかにする。複数傷の場合は異常信号が検出しづらくなることが予備実験により示されており、その詳細についても明らかにする。続いて内輪に損傷がある場合、転動体に損傷が発生した場合についてそれぞれ検討し、各条件下での固有の問題点、留意点を明らかにし、有効性を検証する。最終的には、本診断法の適用事象範囲を拡大するとともに、その限界を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) まずはじめにDSPボードによる処理回路と機構の試作と改造を進める。提案方法のリアルタイム信号処理回路を設計し、システムを試作する。数rpm~数千rpmの回転に対する検討を可能にさせるよう、モータの交換と機械構造を含めた現有の回転実験装置を改造する。次に試作装置を調整する。試作回路の調整のための予備実験を実施する。予備実験はこれまでにオフライン処理していた実験と同条件での検証実験している。同条件とは、回転数が10, 20, 40, 200rpmで、かつ模擬損傷が外輪に一箇所の場合の条件である。その後、提案診断法の適用条件事例の増加と診断システムとしての確実化を検討する。回転数が数rpmでの検証実験を進める。処理回路メモリ限度での最低回転速度での診断を実施する。損傷部位が複数箇所の場合への適用と問題点を洗い出し、それに対する対処法を検討する。最後に診断結果の高精度化を図る。診断結果波形の信号レベルと損傷度合いの相関を調査する。

(2) 次に傷が傷通過周期内で2か所に信号が発生しうような位相に2つの損傷を設けた場合について検討し、その上で本手法の適用条件事例の増大を図る。軸受の外輪に加え内輪に損傷がある場合も検討するため、軸受をこれまで実施していた円錐ころ軸受から平行ころ軸受に変更し、内輪軌道面への損傷

についても調査できるよう実験装置を改造する。その際、軸受にラジアル荷重を負荷できるように装置を大幅に設計変更する。装置改造を完成させた上で内輪損傷および転動体に損傷がある場合についても診断手法を検討する。1個の転動体の1ヶ所に模擬損傷を施した軸受で検討する。回転によって変化する転動体の位置と負荷方向との位置関係と信号の検出との関係を調査し、実用に向けた検討を実施する。

(3) 円筒ころ軸受により、外輪と内輪の損傷に対する本研究の提案法の調整法と有効性を明らかにしたが、引き続き転動体に損傷がある場合についても診断法の有効性を検討する。内輪に損傷がある場合に、損傷による異常振動の特殊性と同様に、転動体に損傷がある場合も類似の特殊性があることが推察される。そのためまずは内輪と同様の検討と対応が可能かどうかを検証する。さらに外輪の2か所に損傷がある場合に、2つ目の傷の信号が出ないことを明らかにし、構造的問題かセンサの問題かを引き続き検討し、その原因を明らかにする。またリアルタイム処理化に対しては、DSPボードによる比較的大がかりな処理に対して、実用性を鑑みて、DSPの代わりにPICマイコンIC処理による簡易化を図る。その際データ処理における問題点を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

本研究の提案する軸受診断の信号処理法は、軸の回転に伴う機械振動の中に含まれる軸受の傷に起因するパルス状の異常振動を、想定される発生周期で区分して乗算処理をすることによって発生周期に同期したパルス状振動を抽出して軸受損傷を診断する方法である。その処理をリアルタイムで実行するための問題点を明らかにしながらDSPボードを用いたシステムを構築した。その検討過程で明らかになったのは、演算時間やデータ獲得時間に依りて、DSPの内部クロック動作を継続保持しつつ、演算等に必要の時間を確保して複数の区分周期分の信号を見送る必要があるということである。また同時に実験装置を改造した。図1は改造した実験システムの概略である。

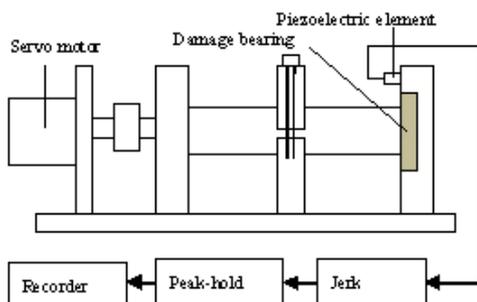


図1 改造構築した実験システム

この改造したシステムにより低速から高速までの検討が行えるようになり、かつ対象軸受を円筒ころ軸受に変更して内輪、外輪、転動体のそれぞれが損傷した場合の検討を実施できるようになった。その結果、回転数に応じた処理を検討した結果、乗算結果のみをDSP上のメモリに残せば、演算処理に必要な記憶容量を限度として低速回転化にシステムとしては対応できるということを実証し、本手法の種々の対象条件に対する原理的有効性を明らかにした。

損傷が複数存在する場合について検討した結果、振動の検出現れ方自体が明確に複数に分離して現れないことが原因で複数傷であることの検出が出来ないことが分かった。このことは転動体と軸受軌道面との動力学的挙動に関することであり、今後の学術的課題であることが明らかとなったが、フレーキング損傷が間隔をあけて複数発生することが殆どないと考えられるため、実用上は問題とならない。

内輪損傷に対する検討の結果、軸受隙間がある軸受が外輪固定・内輪回転で運転される場合、本診断演算処理における区分周期を軸の回転速度に同期した周期にすれば本手法が有効であることを明らかにした。また転動体に対する損傷も、軸受隙間の有無によって演算の区分周期を調整すればよいことも分かった。図2から図4に軸受隙間がある場合の結果の例を示す。

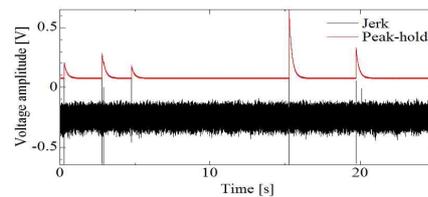


図2 軸受隙間のある軸受の内輪損傷に対する振動波形

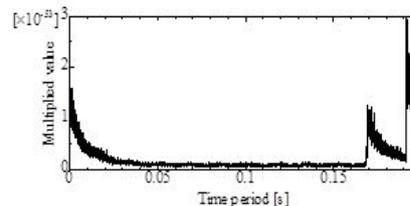


図3 傷通過周期による区分周期での処理

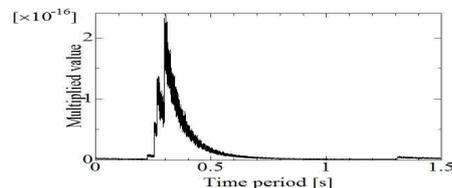


図4 回転数に同期した区分周期での処理

図2は軸受隙間のある軸受の内輪損傷に対する回転数40rpmの振動波形であり、図3と図4はそれを傷通過周期と回転周期で区分した場合の演算結果波形である。本手法は演

算結果が区分周期に一つのピークが現れるかどうかで判定する方法であるが、図2では波形が分断しているが図3の結果では一つの山が現れ、良好に診断できている。

PICマイコンによる演算処理システムを検討した結果、回転数の変化に対して、高速回転側はA/DとD/Aの速度および演算処理速度が律速し、低速回転側はメモリ容量が律速することを明らかにした。

(2)得られた成果の国内外における位置づけおよびそのインパクトは以下の通りである。

振動計測による軸受損傷診断には、一般には加速度センサが用いられる。軸受が高速回転下で使用される場合は、損傷に起因する異常振動信号が大きいので、比較的簡単に検出でき診断も容易である。しかしながら数rpmから数十rpmという非常に低速な回転数ではたとえ軸受に損傷が発生していても、それによって発生する異常振動のレベルが極めて小さく、検出すること自体が難しい。さらに周期的に発生していても振動センサによる検出漏れが発生し、さらに検出した異常振動に含まれる周波数成分がセンサ自身の固有振動数が主体となるために、通常法で診断処理しても損傷を全く診断できない。それに対して、本研究ではオリジナルに開発したジャークセンサによって、加速度センサよりも高い感度でパルス状振動を検出できる。本研究で得られたすべての成果はジャークセンサの優位性を明確化しており、優れたセンサ要素としての振動検出分野に与えた工業的インパクトは大きい。

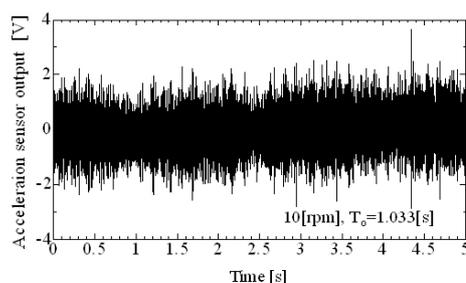


図5 加速度センサの振動波形(10rpm)

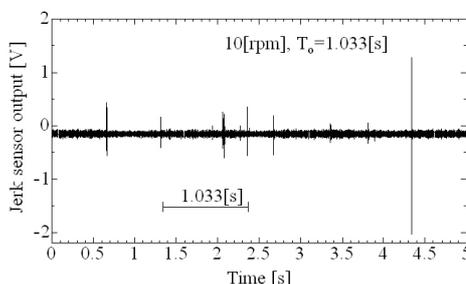


図6 ジャークセンサの振動波形(10rpm)

上記の図5と図6は外輪損傷がある軸受を10rpmという非常に低速な回転数で回転させたときの加速度センサとジャークセンサの同時計測結果である。時間軸を拡大したりして詳細に観察するといずれの波形にも同

一タイミングでパルス状振動が現れているのであるが、定常振動と異常振動とのS/N比の違いは一目瞭然である。ちなみに10rpmではパルス状振動には軸受の固有振動数が殆ど現れないため、図5の加速度センサ出力信号からの異常振動の弁別は困難である。一方、ジャークセンサではこの診断技術の観点からは非常に厳しい運転条件下であっても、本手法と組み合わせることによって容易に異常振動の確認が可能である。

従来の損傷診断法では、低速回転から高速回転までのすべてを網羅できる診断法がなかった。しかし本手法は演算処理方法を変更することなく、同じ方法で低速回転から高速回転まで診断することが出来る。検証では軸の回転数を10rpmから500rpmまでの条件下で診断法の有効性を確認したが、実質的には回転数範囲はさらに拡大させることが容易に可能である。この点は実用化を考えた工業的な観点からは大変に有意であり、診断技術分野に大きなインパクトになっていると判断できる。

さらに低コスト実用化を念頭に置いたPICマイコンによる検討結果は、ワンチップ処理のための課題を具体化、明確化させることができたため、低価格システムの構築に対して重要な情報を世に提供する結果となった。ワンチップマイコンとジャークセンサによる小型診断システムの実現性について問題点を明らかにすることができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

辺見信彦, 転がり軸受の異常診断, 計測と制御, 査読有, 55巻, 2016, 221-227

〔学会発表〕(計7件)

辺見信彦, 圧電式ジャークセンサを用いた転がり軸受の損傷診断, 日本工作機器工業会第20回産学交流会, 2017.3.24, 長野

Nobuhiko HENMI, Kengo SAKAMOTO, Hisashi TANAKA, Diagnosis of Failure in Roller Bearings with Bearing Gap, The 7th International Conference on Positioning Technology, 2016.11.8-2016.11.11, ソウル(大韓民国)

辺見信彦, 転がり軸受の損傷診断に関する最近の事例について, 日本機械学会第16回機素潤滑設計部門講演会, 2016.4.18-2016.4.19, あわら市

坂本健伍, 田中悠, 辺見信彦, ジャークセンサを用いた転がり軸受の損傷診断法【円筒】頃軸受の外輪及び内輪損傷に関する検討), 日本機械学会北陸信越支部第53期総会・講演会, 2016.3.5, 長野

Hisashi TANAKA, Kengo SAKAMOTO, Nobuhiko HENMI, Diagnosis of Roller

Bearing Failure Using Piezoelectric Jerk Sensor, The 19th International Conference on Mechatronics Technology, 2015.11.27-2015.11.29, 東京

田中悠, 坂本健伍, 辺見信彦, ジャークセンサを用いた転がり軸受の損傷診断に関する研究, 2015年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, 2015.11.14, 金沢

田中悠, 竹内信吾, 辺見信彦, 転がり軸受の損傷診断法とその実時間処理, 第14回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会, 2014.4.21-2014.4.22, 長野

〔その他〕

中部イノベーションの技術シーズ集産業技術の芽に本研究内容の一部を紹介, 平成26年度。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辺見 信彦 (HENMI, Nobuhiko)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号: 80256669