

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560284

研究課題名(和文) 高感度実用ジャークセンサの開発とジャークフィードバックによる超精密制振法の実現

研究課題名(英文) Development of high sensitive jerk sensor and realization of ultraprecision vibration control using jerk sensor

研究代表者

辺見 信彦 (HENMI, Nobuhiko)

信州大学・工学部・教授

研究者番号：80256669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来には直接計測できなかったジャークを測定可能にした新しいセンサの高感度化を実現し、さらにそのセンサの応用を目指した。特に残留振動が問題となる柔軟構造を有する搬送体への振動制御法の実現を目的とし、結果として、柔軟構造の対象物の振動を励起しないで位置決めが可能な制御システムを実現するためには、テーブルの位置計測と柔軟構造体のジャークおよび加速度の計測を併用することが有効であるという知見を得た。またセンサの応用として転がり軸受の損傷診断に用いた場合に、従来から行われている加速度センサを用いた診断よりも高感度に信号を検出できることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research aimed at realization of a high gain jerk sensor and application of the sensor. Especially it aimed at realization of new feedback control method for an object with flexural structure which usually had residual vibration problem. As a result, it is found that simultaneous feedback of table position and flexural structure jerk and acceleration is very effective in order to realize a control system so as not to excite the object vibration, even if the controlled object has flexural structure. Also the sensor is applied to bearing failure diagnosis system to detect abnormal vibration signal. It works better than an acceleration sensor which is used in conventional rotary machine diagnostic systems.

研究分野：精密工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：ジャーク 加加速度 メカトロニクス 制振 軸受診断

1. 研究開始当初の背景

(1) 関連研究の動向と位置付け：これまでジャークを検出するセンサの研究はいくつかあったが、センサ構造が複雑であったり、原理的に感度向上できなかつたりして、従来は実用に耐えるセンサがなかった。そのため加速度センサの出力を微分したS/N比の低い信号をフィルタ処理するなどして利用されてきた。本研究で考案した新しいセンサ原理は非常に簡易であるが、ジャークを直接に検出する世界初の試みであり、しかも原理だけでなくセンサ構造も簡素化が可能のため、低コストでの実用化が期待できる。また実用センサがなかったためジャークを直接フィードバック信号に利用し、残留振動が重度に問題になるような対象物をリアルタイムで制振する手法が検討されたことがなく、本研究により初めて検討されることになる。

(2) 研究推進の動機：ジャーク量は乗り物の乗り心地悪化防止のために抑制の対象とされたり、超精密工作機械での振動励起の回避のための工具経路軌道の決定に利用されたりしていた。しかし実用センサが無かったため、加速度センサや運動の軌跡からの推定値などが利用されていて、技術的な発展が望めなかった。これまでの研究を通じて、圧電効果によって生じる電荷を、加速度センサ回路の電気的構成を変えて計測すればジャークを非常に簡単に計測できるという新しい測定原理を発想するに至った。また、例えば液晶パネルのように振動が問題となって高速搬送が難しい対象があるが、ジャークを直接フィードバック信号に利用することができれば、そういった制振が難しい柔軟構造を有する搬送体に対しても新しい高速位置決め技術の実現の可能性があり、有効な振動制御法が実現すれば工業的に大きく貢献するとうことが予想され研究推進の動機となった。

2. 研究の目的

本研究は、これまで直接計測することのできなかつたジャーク（加加速度）を、世界で初めて簡易に直接計測を可能にした新しい測定原理によるセンサの高感度化を実現し、さらにそのセンサを用いて、残留振動が問題になっている柔軟構造を有する搬送体への新しいフィードバック振動制御法を確立することを目的とする。目標はセンサの高感度化とその試作センサによる新しい振動制御法の実現であり、高感度化については 0.01m/s^3 のジャーク測定できる性能を達成することを目標とする。制御法に関しては、残留振動が著しく問題となる柔軟構造を有する搬送体の制御について、従来は実施することができなかつたジャークの直接フィードバックによって構造振動を励起することのない高速搬送の実現を目指す。また開発した高感度ジャークセンサを応用することも目指す。その一例として回転機械の損傷診断への適用と従来利用されてきた加速度センサ

に対する優位性についても検証することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 概要：研究の方法は、主として最初にセンサの機械的構造の低剛性化による高感度化を検討し、それに続いて計測電子回路の高ゲイン化を検討し、それらを統合して実用的なジャークセンサを製作した。次に試作した高感度センサを用いて適切なフィードバック制御系の構成を検討し、その有効性を検証した。いずれにおいても計算機シミュレーションと実機による実験を併用して研究を進行させた。さらに開発したジャークセンサの応用について検討した。

(2) センサの高感度化設計及び製作：機構における高感度化をシミュレーションにより検討した。センサ構造の低剛性化による高感度化のための基本構造し、振動減衰性の向上と干渉動作について検討した。さらに具体的な寸法については最適化を図った。シミュレーションを援用しながらセンサを設計し試作素子を製作した。つぎにセンサ回路の高感度化を検討した。計測のためのハイゲイン電気回路の基本構成を検討した。増幅倍率を上げたことによるS/N比の低下と、トリボ効果による信号の擾乱への対策を検討した。

(3) 柔軟構造を有する振動制御の検討：電磁石アクチュエータ駆動する上に並行ばね機構で懸架した台を搭載し、テーブルの位置制御とその柔軟構造物の振動抑制の同時制御を検討するための装置を製作した。制御解析ソフト MATLAB で運動をシミュレーションしながら制御特性を調査し、適切な制御パラメータを検討するとともに、DSP ボックスと MATLAB の実時間制御コード生成機能を利用して実機にそのフィードバック制御法を適用し、検証実験を進めた。

(4) 開発センサの応用の検討：開発した高感度ジャークセンサの優位性を活用できる応用として、転がり軸受の損傷診断への適用を検討した。従来は回転機械の損傷診断には加速度センサが用いられていた。通常では異常振動の信号が検出しにくい低速回転軸受の損傷診断に対してジャークセンサの適用を検討し、加速度センサに対する異常パルス状振動検出性能の優位性を検証した。

4. 研究成果

(1) ジャークセンサの高感度化：ジャークとは加速度の単位時間当たりの変化量のことである。運動変化の急峻さを表す一物理量である。日本語では加加速度とか躍度などと呼ばれている。図1に本研究で開発した圧電式ジャークセンサの原理図を示す。内部質量が圧電体を介して、振動する被測定対象上に設置さ

れているとき、被測定対象が図の上下方向に動くと、内部質量の慣性力によって圧電素子に変形する。圧電効果によって素子に発生する電荷量は、外部電界が作用しない状況下では圧電体の歪量に比例する。そのためセンサ構造の機械的な固有振動数の影響を受けにくい振動周波数では、歪量は内部質量の慣性力に比例することになり、結果として発生電荷は被測定対象の加速度に比例する大きさとなる。このとき、図1のように圧電素子の両端電極が導線によって短絡されているとすれば、加速度によって発生した電荷は導線を伝って電極間を往来し、導線内部には電流が発生する。電流は電荷の時間微分であるため、この電流値を測れば加速度の時間微分であるジャークに比例した値を測定できる。これが本センサの測定原理である。

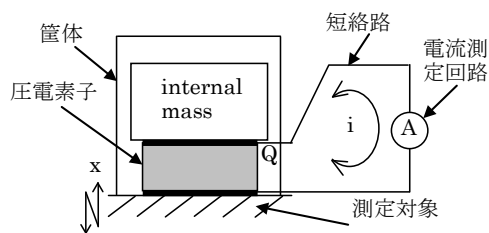


図1 開発したセンサの計測系構成

図2に新しく設計・試作したセンサの断面構造の概略を示す。中央柱に円板型のバイモルフ圧電素子を固定し、圧電素子の自由端側の円周部に質量体を取り付けた構造となっている。また図には描画していないが、センサの機械的Q値を下げるために緩衝樹脂シートを圧電素子と支柱上部の間に挿入している。試作センサの1次の固有振動数は約3kHzであった。高ゲイン化させたときに問題となるトリボ効果による雑音に対処するため計測回路をセンサの筐体内部に内蔵させた。またセンサ内部には、圧電素子の発生する電荷の流動による電流計測回路と信号増幅アンプのほかに、ノイズ対策としてカットオフ1kHzのローパスフィルタを内蔵させている。

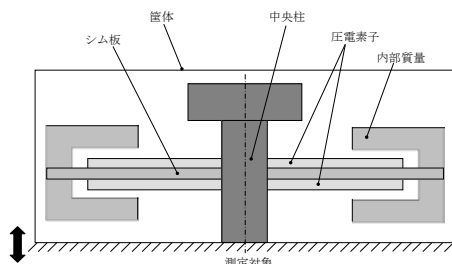


図2 開発したセンサの内部構造の概略

設計・試作したジャークセンサ素子の周波数特性を図3に示す。同図より本センサは、

周波数が10Hz以上の範囲でセンサ感度が約0.04V/(m/s³)のアナログ出力であり、ノイズレベルから判断して目標としていた0.01m/s³程度の大きさのジャークを計測する能力を有しており、さらに位相遅れなく応答していることがわかる。

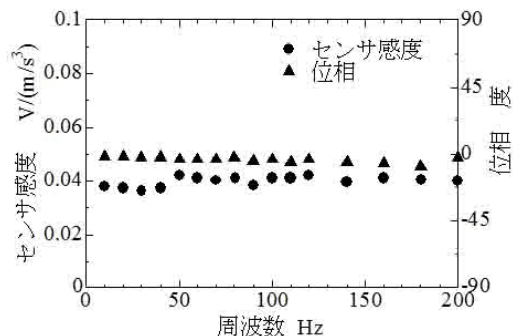


図3 高感度化したセンサの周波数特性

(2) 柔軟構造を有する振動制御：開発した圧電式ジャークセンサによってジャーク信号をフィードバックの一つに加え、対象物の運動性能の向上を図った。図4は試作した制御実験装置である。制圧空気軸受により保持された1自由度のスライドテーブルが、テーブル端に設置された電磁石によるムービングコイル式のリニアアクチュエータで駆動できるようになっている。エアスライドテーブルの上には並行ばね機構を介してプレートを搭載している。スライドテーブルの変位をリニアエンコーダにより、搭載プレートの振動を開発したジャークセンサと加速度センサによりそれぞれ計測している。制御系としては微分先行型PI-Dコントローラによりエアスライドテーブルの位置を制御し、それに搭載プレートの加速度やジャークのフィードバックを重畳させたときの制振効果を比較検討した。

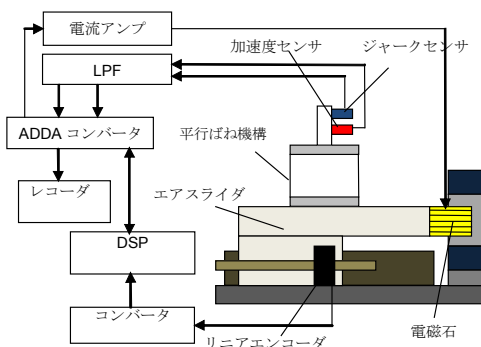


図4 柔軟構造を搭載したエアスライドテーブルの計測制御システム

図5と図6に、フィードバック量としてテーブルのPI-D制御のみの場合、PI-Dにジャーク量か加速度量のいずれかを、あるいはジ

ジャーク量と加速度量を同時に重畳させた場合の応答の差を示す。それぞれの図が示しているのは、図5が搭載プレートのジャーク量の応答で、図6がそのときのスライドテーブルの変位量の応答である。これらの図からわかることは、加速度のフィードバックが制振性能を大きく左右しているという点と、ジャークと加速度をフィードバックさせることによって、変位だけでなくジャークの最大値も低下させることが出来るということである。ジャークを低下させるということは、テーブルに搭載した搬送物に対して過度な急加速や急制動が発生しないことを意味しており、重要である。加速度とジャークの併用が制振性能向上に効果的であるという知見が得られた。

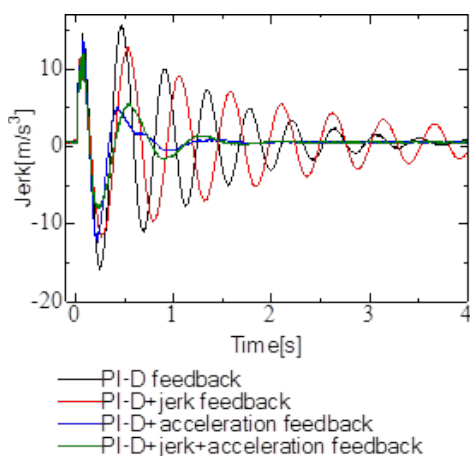


図5 搭載プレートのジャーク応答に対する変位・加速度・ジャークのフィードバック効果

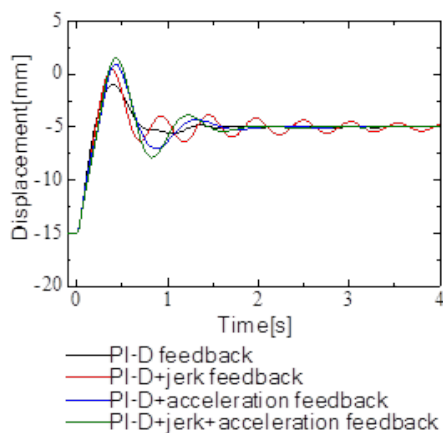


図6 スライドテーブルの変位応答に対する変位・加速度・ジャークのフィードバック効果

(3) ジャークセンサの応用検討：本研究で考案開発したジャークセンサを転がり軸受の損傷診断に応用した場合の、異常振動の検出性能について調査した。軸受の損傷診断は、従来から加速度センサを用いて行われてきた。高速回転の場合には加速度センサでも良好に信号検出が可能である。しか

し低速回転の場合はパルス状の異常振動の大きさが非常に小さく、検出が困難であった。図7と図8は、軸受の外輪表面に小さな損傷を有する転がり軸受を、10rpmという極低速で回転させた場合に、軸受近傍で計測した振動信号である。図7は加速度センサ、図8はジャークセンサの信号である。損傷による異常振動は、軸受の転動体が傷を通過するごとに発生するパルス状振動となる。しかし加速度センサの出力ではそのほとんどが定常振動ノイズに埋もれてしまっているのに対して、ジャークセンサではパルス状振動が高いS/N比で計測されることがわかる。本研究ではさらに、低速回転時の軸受の異常振動がどのような特徴を有しているのかを詳細に検討し、それによって新しい損傷診断法を考案し、その有効性も検証した。このような詳細検討と検証を実施できたのも、ジャークセンサが高周波数領域の振動成分に対して高感度であることからきており、本研究での開発の成果の結果であるといえる。

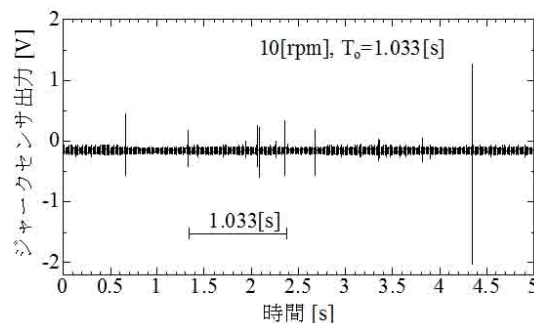


図7 ジャークセンサによる軸受損傷の検出信号

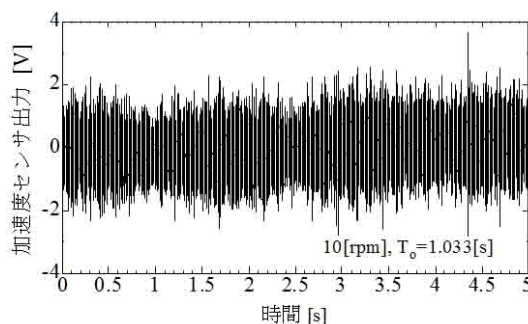


図8 加速度センサによる軸受損傷振動の検出信号

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 辺見信彦, ジャークセンサによる転がり軸受の損傷診断に関する研究 (第2報, 新しい診断法の提案と有効性の検証), 日本機械学会論文集C編, 査読有, Vol. 79, No. 801, 2013, pp. 1786-1797, <http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.79.1786>
- ② 辺見信彦, 高木良祐, ジャークセンサに

よる転がり軸受の損傷診断に関する研究
(第1報, ジャークセンサ検出による低
回転時の振動信号の特長), 日本機械学会
論文集C編, 査読有, Vol. 79, No. 801,
2013, pp. 1775-1785,
[http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.79.
1775](http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.79.1775)

[学会発表] (計6件)

- ① 山形拓也, 辺見信彦, ジャークセンサ出力のフィードバックによる運動制御の研究, 2013年度日本機械学会年次大会, 2013年9月9日, 岡山市.
- ② Nobuhiko Henmi, Shingo Takeuchi, Masaki Kuroiwa, Application of piezoelectric jerk sensor - Detection of failure in roll bearing and new diagnostic method - The Fifth International Conference on Positioning Technology, 2012年11月15日. 台湾.
- ③ 荻原光人, 辺見信彦, ジャークセンサを用いた運動制御に関する研究, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2012, 2012年9月25日, 長野市.
- ④ 辺見信彦, 荻原光人, 山形拓也, 位置決め制御におけるジャークフィードバックの効果, 2012年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2012年9月14日, 北九州市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辺見 信彦 (HENMI, Nobuhiko)

信州大学・工学部・教授

研究者番号: 80256669