

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：25406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：24760322

研究課題名(和文)音・振動間の非線形相関を利用した機械の異常診断法

研究課題名(英文) Fault diagnosis method for rotation machine by using nonlinear correlation between sound and vibration

研究代表者

折本 寿子(益池寿子)(Hisako, Orimoto)

県立広島大学・経営情報学部・准教授

研究者番号：80533207

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文): 迅速で正確な機械の異常診断を誰でも容易に行うことが可能である手法を導き出すことを目的とし、音と振動の相関情報を利用することで機械の異常状態を数値的に判断可能な診断法を開発した。具体的には、通常は正常な場合のみの情報が得られるため、正常な状態のみの情報で異常診断可能な分布評価法を開発した。次に、音と振動の情報を正常時と異常時の場合に計測し、取得したデータを用いてそれぞれの状態変数を表す相関情報を導き出し、数値で判断可能な診断法を開発した。提案手法の有効性は、回転機械から取得したデータを用いて異常診断を行うことで確認した。

研究成果の概要(英文): The purpose is to derive a method which can easily, quickly and accurately diagnosis machine faults. In this study, the method that can numerically determine faults situation of machine was developed by using correlation information of sound and vibration. More especially, a diagnosis method based on the estimation of the changing information of correlation between sound and vibration is considered by using prior information in only normal situation. Next, a diagnostic method which can detect the part of machine with fault for the specific multiple faults is proposed by measuring simultaneously the time series data on sound and vibration. The effectiveness of the proposed theory is experimentally confirmed by applying it to the observed data emitted from a rotational machine driven by an electric motor.

研究分野：信号処理

キーワード：異常診断 音と振動 相関情報 確率論 信号処理 ベイズ推定

1. 研究開始当初の背景

(1) 様々な生活・産業機器やシステムが複雑化・高度化し、効率と利便性が要求されている。一方、安全性・信頼性の確保とそのためのコスト削減が益々重要となっている。このような背景から、この分野においては、例えば、機械が停止し社会問題となるなど、重大事故が発生する前に未然に機械の異常を早期に検出し、適正な措置を行う対策方法の開発が、現在、もっと重要な研究課題である。

申請者は、これまで交通騒音、振動分野において、対象信号の状態を静的および動的に解析し、不規則性や不確実性を含む騒音・振動環境の状態推定に関する研究を行ってきた。

本研究では、機械の異常診断を誰でも容易に判断できるよう、数値的な評価により結果を表す新たな処理技術を研究開発した。

(2) 従来から実施されている機械の異常診断においては、熟練者が稼働中の機械の異常音(耳)や振動(体感)または停止機械の打音検査の状況によって、部材の摩擦・劣化やねじの緩み等を発見している。さらにこれを発展させ、機械が発する音または振動のどちらか一方あるいは双方を個別に解析する診断法が、周波数スペクトラムの変化に着目することにより開発された。しかし、この標準的な方法では、複数の異常が複合した状態を調べる目的に対しては不向きであり、また、音(または振動)に関する周波数情報と機械の状態に関する情報を蓄積し、異常時における機械の音(または振動)の周波数特性を把握する必要がある。このため、個々の機械についての長期にわたるデータ収集と異常を複合的に判断できる専門家の育成が必要となり、汎用的な診断法は見出されていなかった。

2. 研究の目的

(1) 機械から発生する音と振動の情報を利用し、機械の異常状態を数値により視覚的に表すことができ、コンピュータによる機械の異常状態の判断が可能な手法の開発を目的とした。

音と振動の精密な情報を得るには周波数分析を行いその特徴量を抽出することが一般的である。しかし、周波数分析には多くの前処理が必要となるなどの問題が生じる。

本研究の目的は、時系列に得られた音と振動の相関情報を捉えることができる非線形の確率モデルを導入することにより、新たな機械の異常診断アルゴリズムを提案することである。

(2) 回転する機械から音圧レベルと振動加速度のデータを同時計測し、機械の異常状態を診断するため、音と振動に存在する相関関係を階層的(1次の相関、2次の相関、・・・など)に表現できる確率的手法を導出した。次に、機械の正常時と異常時に

おける相関特性の相違を数値化し、コンピュータ上で異常診断を行う手法について考察した。

(3) 提案した手法の有効性を実際に計測した回転機器からの計測データの情報に適用することにより、実験的に検証することを最終的な目的とした。

3. 研究の方法

(1) 事前情報の少ない異常診断のためのアルゴリズムの開発

一般には、異常発生前の情報のみが得られるため、異常が発生する前の事前情報のみを基に異常診断を行う手法に関する、新たなアルゴリズムを開発した。具体的には、まず音と振動の正常な状態のみのデータを利用して相関特性を算定した。次に、機械から発生した音圧レベルの計測データをもとに振動加速度を推定する。その際、相関特性を算定するアルゴリズムを適用することにより、正常な場合、計測した音圧レベルから振動加速度を推定することができ、異常が発生している場合、相関特性が変化しているため、振動加速度を推定できないことを活用したアルゴリズムである。同様に、振動加速度から音圧レベルを推定することにより、異常発生の有無を推定するアルゴリズムも開発した。提案した、事前情報の少ない異常診断のためのアルゴリズムにも提案した手法の有効性を確認している。

(2) 複数の異常に対する異常診断アルゴリズムの開発

複数の異常を検知できるアルゴリズムの開発を行った。まず、特定の一か所の異常状態の診断法を考察した。具体的には、正常状態と予め想定される異常状態との相関特性を導き出し、正常、異常を識別する状態変数を採用し確率分布を用いて推定式を導出した。次に、複数同時に異常が発生する場合を想定し、正常状態と想定される複数の異常状態の相関特性を導き出した。本研究では、複数異常を2か所同時に発生することを仮定しアルゴリズムの開発を行った。具体的には、3種類の状態を表すことができる変数を用いた三項分布を利用し、確率分布を展開表現で表し推定式を導き出した。

提案した2種類の推定式に対して、それぞれ計測した回転機器から計測した音と振動のデータを用いて実験的にも有効性を確認した。

4. 研究成果

(1) 提案した異常診断の有効性を確認するため、回転機械から発生した音圧レベルと振動加速度の同時観測データに適用することにより、回転機械の異常診断を行った。実験データは、正常時、異常時の音と振動の観測データをサンプリング間隔 0.1 秒

ごとに 5000 個ずつ計測し、異なる時間帯で 2 回計測した。

機械に異常が発生する前後における音、振動に関する観測データ間の散布図を Fig.1 に示す。異常が発生した場合、相関特性に変化が生じていることは明白である。よって、音と振動には相関が存在し、相関の変化情報を検出することで異常診断が可能であるといえる。

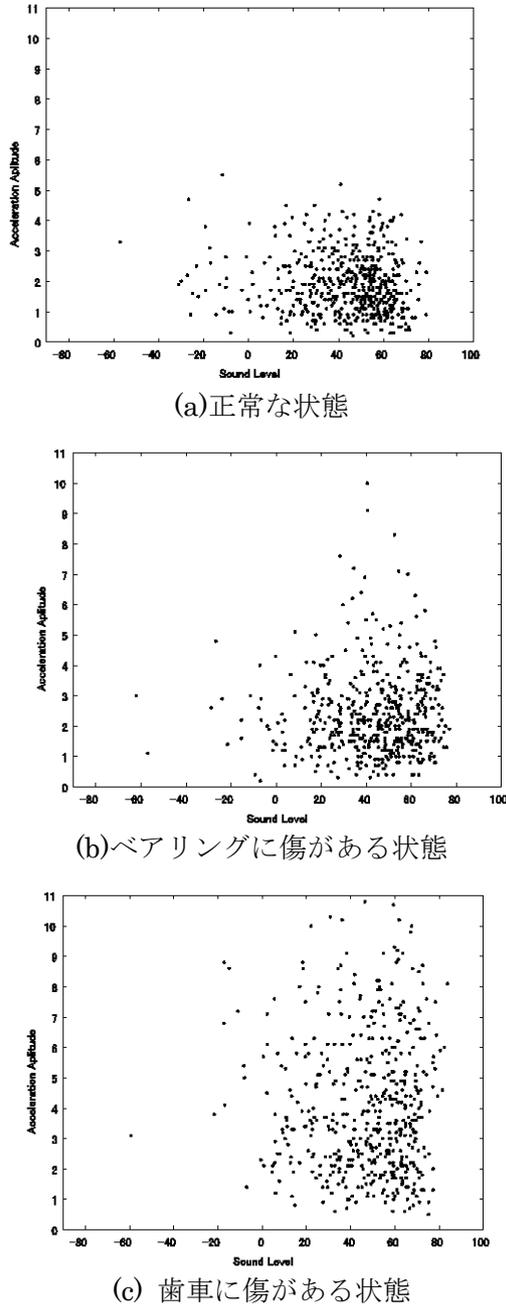


Fig.1 音と振動のデータにおける散布図

(2) 事前情報として、正常な情報のみを利用して音もしくは振動に対する確率分布を予測する。異常発生時には、音と振動の相関情報が変化するため、各々の確率分布を予測することが困難になる。したがって、予測誤差を評価することにより、異常発生を診断することが可能となる。異常を示す

状態として、傷が存在するベアリング、傷が存在する歯車を用いて実験を行っている。一般に推定誤差の評価には確率分布により累積分布の方が適しているため、累積分布で評価し、振動の計測データをもとに音圧レベルを推定した結果を Fig.2 に示す。また、実際の計測データと推定データの誤差を算出した結果を Table.1, Table.2 に示す。各 Table には、10%レベル値から 90%レベル値まで 10%刻みに計測した予測誤差の平均と、50%レベル値の予測誤差を示している。グラフからも、計測データと推定データに大きな誤差が発生し、異常状態が

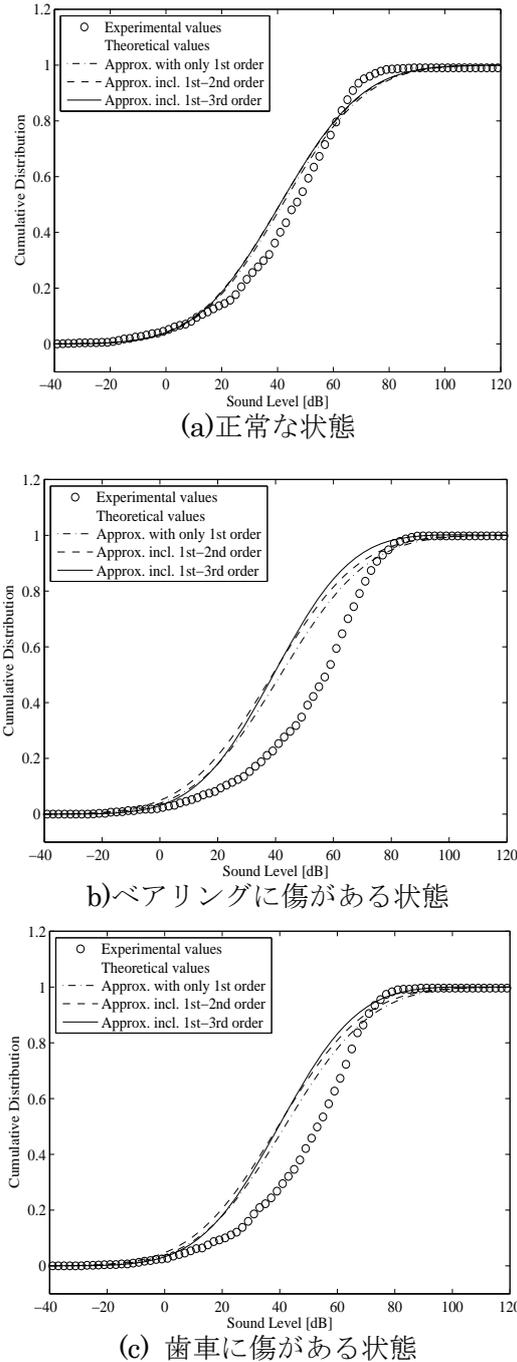


Fig.2. 振動加速度データをもとに音圧レベルを推定した累積分布

Table 1. 振動加速度データをもとに音圧レベルを推定した推定誤差

Data point	Order	Prediction errors for cumulative distribution			Prediction errors for L ₅₀		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Normal situation	1-1000	8.0	8.0	8.0	6.0	6.0	6.0
	1001-2000	2.0	2.0	2.0	10.0	10.0	10.0
	2001-3000	8.0	8.0	8.0	4.0	4.0	4.0
	3001-4000	4.0	4.0	4.0	10.0	11.0	11.0
	4001-5000	8.0	8.0	8.0	4.0	4.0	4.0
Failure situation for bearing	5001-6000	6.0	5.0	5.0	6.0	7.0	7.0
	6001-7000	2.0	1.0	0.0	12.0	13.0	13.0
	7001-8000	4.0	3.0	3.0	6.0	7.0	7.0
	8001-9000	2.0	1.0	1.0	10.0	11.0	11.0
	9001-10000	8.0	7.0	7.0	6.0	7.0	7.0
Failure situation for cogwheel	10001-11000	2.0	4.0	5.0	14.0	16.0	16.0
	11001-12000	4.0	6.0	10.0	14.0	17.0	16.0
	12001-13000	0.0	2.0	3.0	12.0	14.0	14.0
	13001-14000	4.0	6.0	9.0	16.0	19.0	18.0
	14001-15000	0.0	2.0	3.0	12.0	14.0	14.0

Table 2. 音圧レベルデータをもとに振動加速度を推定した推定誤差

Data point	Order	Prediction errors for cumulative distribution			Prediction errors for L ₅₀		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Normal situation	1-1000	0.17078	0.17078	0.17078	0.28333	0.05000	0.05000
	1001-2000	0.27538	0.28333	0.27538	0.36248	0.05000	0.05000
	2001-3000	0.21148	0.21148	0.21148	0.32702	0.15000	0.15000
	3001-4000	0.39476	0.40311	0.39476	0.49917	0.25000	0.25000
	4001-5000	0.15000	0.15723	0.15723	0.25000	0.05000	0.05000
Failure situation for bearing	5001-6000	0.84080	0.84869	0.84080	0.92391	0.65000	0.65000
	6001-7000	1.12854	1.13541	1.14903	1.22395	0.95000	0.95000
	7001-8000	0.73352	0.74106	0.73352	0.81257	0.55000	0.55000
	8001-9000	0.80156	0.80709	0.80156	0.88459	0.55000	0.55000
	9001-10000	0.85781	0.86426	0.85781	0.93705	0.65000	0.65000
Failure situation for cogwheel	10001-11000	1.52179	1.54209	1.53632	1.60078	1.25000	1.25000
	11001-12000	2.28236	2.30272	2.29740	2.35189	1.55000	1.55000
	12001-13000	1.52834	1.53342	1.54353	1.60009	1.05000	1.05000
	13001-14000	2.24456	2.26526	2.25985	2.30513	1.75000	1.75000
	14001-15000	1.54281	1.54928	1.56356	1.63240	1.25000	1.25000

発生した場合には、推定が困難となった。また、数値的にも推定誤差が大きくなっていることがわり、累積分布に基づく推定誤差による異常診断法の有効性が確認できた。

(3) 次に、特定の異常を想定した場合の異常原因に対する特定診断に適用した。正常状態の情報と異常状態の情報を使って相関特性を算出し、その後アルゴリズムにより正常確率、異常確率をそれぞれ算出することで、確率の大きさによって異常診断の評価を行った。1回目の観測データを **data1**、2回目の観測データを **data2** とする。異常の具体例として、異常1および異常2にそれぞれ、ひずみのあるベアリングと傷が存在する歯車を採用した。実験は、まず、学習用データと予測用データが同一の場合の実験データに適用した。学習用データとして、**data1** の正常、異常1、異常2のデータを各500個ずつ、合計1500個のデータセットを用いた。予測用データは500個のサブデータセットを作り、50個ずつずらしながら予測を行った。すなわち、1~500は正常データのみ、次のサブデータセットは正常450個+異常1を50個含んだ500個のデータを用いて実験を行った。Data points が1000以上になったとき、異常1と異常2のデータが混在した状況となる。データ作成図を Fig.3 に示す。正常確率、異常1の確率、異常2の確率をそれぞれ算出し、確率の大きさによって異常診断の評価を行った予測結果を Fig.4 に示す。次に、学習用データと予測用データが異なる場合において、同様に異常診断を行った。ここでは、**data1** の正常、異常1、異常2のデータを500個ずつ、合計1500個を学習用データとし、**data2** を予測用データと

して用いた予測結果を Fig.5 に示す。Data Points が500の時は正常状態を示し、500~1000は異常1の状態を表すデータが増加し、1000~1500は異常2の状態を表すデータが増加している。提案手法による確率の結果も、それぞれの状態を表すデータが増加することによって、確率も同様に变化しており異常原因に対して確率を用いて診断できることを実験的にも確認できた。

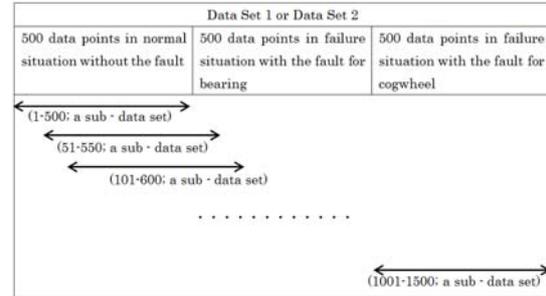


Fig.3 Data set と Sub Data Set の作成図

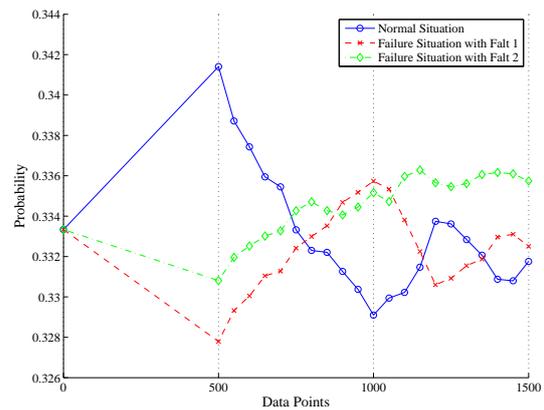


Fig.4. 学習用データと予測用データを同一にした異常診断結果

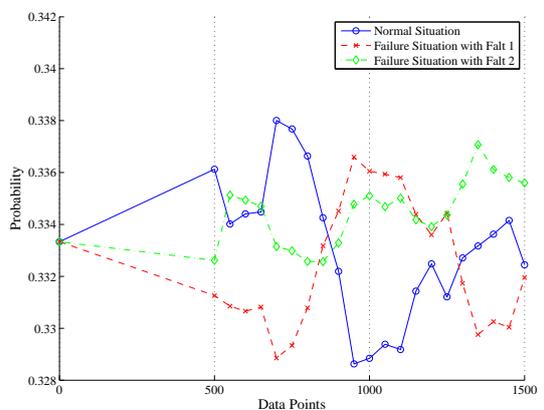


Fig.5 学習用データと予測用データが異なる異常診断結果

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 8 件)

- ① Ikuta, H. Orimoto and H. Ogawa: Detection of Machine Failure by Using Information on Higher-Order Correlations Between Sound and Vibration, *Electronic and Communications in Japan*, 査読有, Vol. 96, No. 10, pp. 50-59 (2013).
- ② H. Orimoto, A. Ikuta: State Estimation Method of Sound Environment System with Multiplicative and Additive Noises, *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 査読有, Vol.8, pp. 307-312 (2014)
- ③ A. Ikuta and H. Orimoto: Stochastic Signal Processing for Sound Environment System with Decibel Evaluation and Energy Observation, *Mathematical Problems in Engineering*, 査読有, Vol. 2014, Article ID 208612, 8 pages (2014)
- ④ A. Ikuta, H. Ogawa and H. Orimoto: Signal Processing in Power State Variables for Noise Cancellation of Electromagnetic Environment, *Electrical Engineering in Japan*, 査読無, 学会からの依頼, Vol. 189, No. 1, pp. 36-46 (2014). DOI: 10.1002/ej.22578
- ⑤ A. Ikuta, H. Orimoto, N. H. Siddique and L. P. Maguire: Statistical Evaluation of Complex Sound Environment with Background Noise, *International Journal of Acoustics and Vibration*, 査読有, Vol. 20, No. 1, pp. 41-46 (2015).
- ⑥ H. Orimoto, A. Ikuta and Y. Xiao: Method for Evaluating the Statistical Relationship between Sound Pressure Level and Noise Annoyance Based on a Nonlinear Time Series Regression Model and an Experiment, *International Journal of Acoustics and Vibration*, 査読有, Vol. 21, No. 2, pp. 145-151 (2016). DOI: 10.20855/ijav.2016.21.2403
- ⑦ H. Orimoto: Statistical Fault Diagnosis Methods by Using Higher-Order Correlation Information between Sound and Vibration, *Intelligent Information Management*, 査読有, Vol.8 No.4, pp.87-47, Pub. Date: July 12, (2016) DOI: 10.4236/iim.2016.84007
- ⑧ A. Ikuta, H. Orimoto, G. Gallagher: State Estimation for Fuzzy Sound Environment System with Finite Amplitude Fluctuation, 査読有, Vol.10

No.7, June 2017, pp. 625-638 (2017)

DOI: 10.4236/jsea.2017.107034

[国際会議] (計 6 件)

- ① H. Orimoto, A. Ikuta and Y. Xiao : Stochastic Evaluation Method based on Nonlinear Time Series Regression Model between Sound Pressure Level and Loudness with an Experiment, *Proceedings of 20th International Congress on Sound and Vibration*, 8 pages, (July, 2013).
- ② A. Ikuta and H. Orimoto: Stochastic Signal Processing for Cancellation of Additive and Multiplicative Noises in Sound Environment Systems, *Proceedings of Inter Noise 2013*, 10 pages, (September, 2013), (Invited Paper).
- ③ H. Orimoto and A. Ikuta: Stochastic Modeling of Sound Environment System with Multiplicative Noise and Noise Cancellation Method, *Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematical Methods, Mathematical Models and Simulation in Science and Engineering*, 6 pages, (February, 2014), (Best Paper).
- ④ A. Ikuta and H. Orimoto: Fuzzy Signal Processing of Sound and Electromagnetic Environment by Introducing Probability Measure of Fuzzy Events, *FCTA 2014, International Conference on Fuzzy Computation Theory and Applications*, 9 pages, (October, 2014), (Best Paper).
- ⑤ H. Orimoto and A. Ikuta: Statistical Faults Diagnosis Method by Using Higher-Order Correlation Information between Sound and Vibration of Rotational Machine, *Proceedings of 23rd International Congress on Sound and Vibration*, 8 pages, (July 2016)
- ⑥ H. Orimoto and A. Ikuta: State estimation method for sound environment based on an extension type UKF by considering non-Gaussian noise, *Proceedings of 24th International Congress on Sound and Vibration*, 8 pages, (July 2017)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 折本寿子, 生田顕: 音と振動の相関情報による機械の異常検出, *日本音響学会講演論文集*, pp. 685-686 (2014. 3)
- ② 折本寿子, 生田顕: 機械の異常に対する音・振動間の相関情報活用による診断法, *電子情報通信学会研究報告 (応用音響)*, pp. 13-18 (2014. 11)

- ③折本寿子, 生田顕: 多項積分布を用いた機械の複数異常に対する音・振動間の相関情報による異常時診断法, 計測自動制御学会, pp. 166-167 (2014. 11)
- ④H. Orimoto, A. Ikuta: Faults diagnosis method by using multinomial distribution based on correlation information between sound and vibration, 日本音響学会論文集, pp. 1518-1584 (2017. 9)

6. 研究組織

(1)研究代表者

折本寿子 (ORIMOTO HISAKO)

県立広島大学・経営情報学部・准教授

研究者番号: 80533207