

氏 名	ぶい ふい きえん BUI HUUY KIEN
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 0 1 6 号
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学 位 論 文 題 目	Vibration-based Condition Monitoring of Plastic Gear using Deep Learning Approaches (深層学習法を用いた振動解析による樹脂歯車の状態監視)
審 査 委 員	(主査)教授 射場 大輔 教授 森脇 一郎 教授 増田 新

論文内容の要旨

本論文は、運転中の歯車がかみ合う振動を解析することにより、その健全性を評価するシステムの開発について論じたものである。

第 1 章の緒論では、本論文の構成について述べたのち、ヘルスマモニタリング分野に対する本論文の貢献についてまとめている。第 2 章では、樹脂歯車、信号処理方法、深層学習、ヘルスマモニタリングシステムについての基礎的な知識について述べることで、本研究の背景について説明し、樹脂歯車の健全性評価を行うシステムを開発するモチベーションについて説明している。

第 3 章では、樹脂歯車の運転試験装置について説明し、試験歯車の諸元と運転条件について、そして加速度センサによるかみ合い振動の計測及び高速度カメラによる歯元画像の取得方法について説明している。さらに樹脂歯車の運転中に実際に発生した損傷モードについて分類し、本研究で対象とする損傷モードである歯元き裂について述べている。

第 4 章では、深層構造を有する畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を利用した樹脂歯車のき裂検知システムとそれに与える学習用データセットの創成方法について述べている。第 3 章で述べたシステムを用いて運転中に計測したかみ合い振動データを FFT によって周波数領域に変換した後、軸の回転周波数ごとに生じているピークを抽出してその大きさによって 256 段階のグレースケール情報を与えて平面上に並べることでかみ合い振動画像を創成している。さらに、高速度カメラの画像データよりき裂の有無を判別し、かみ合い振動画像にき裂有無のラベルを付すことで、人工知能の学習用データセットを得ている。多数の樹脂歯車の運転試験結果から同様のデータを創成し、このデータを CNN の一つのモデルである VGG16 に学習させることでき裂の有無を判断するシステムを構成し、システムの有効性を検討している。第 5 章では、運転時のトルク、回転速度を変更して回収したデータセットを学習済みの人工知能に与え、運転条件の変更に対するシステムの頑強性について調査し、条件変更に伴う性能の悪化を評価し、さらに性能を改善するための方法について検討を行なっている。

第 6 章では、樹脂歯車のかみ合い振動を解析することにより、従来から解析の重要な対象であるとされたかみ合い振動数近傍以外の振動数帯において、歯元き裂発生前に変化が生じることを明

らかにしている．特にかみ合い振動数より低い振動数帯域のピークを総和することで得られる指標が有用であることを示している．第7章では，第6章で明らかにしたき裂発生前に生じる変化を示す振動数帯域のデータを用いて健全性を評価する指標を作成し，複数の運転試験から回収されたかみ合い振動データと指標を組み合わせることで学習用データを創成し，かみ合い振動から健康度合いの悪化を推定する人工知能を構成している．さらに，その推定した健全度合いから折損までに掛かる時間を推定し，残存する運転可能な時間を推定するシステムを開発している．第8章では，現在残されている樹脂歯車のヘルスマonitoringに関する幾つかの課題を述べ，それに対する取り組むべき手法を紹介した後，第9章で本論文の結果を総括するとともに今後の展望について述べている．

論文審査の結果の要旨

本論文は，運転中の歯車の状態をモニタリングすることを目的に，歯車のかみ合い振動のデータを人工知能に学習させて損傷の有無を検知するシステムの開発について論じたものである．高速カメラで歯元き裂を監視しながらかみ合い振動を計測するシステムを開発し，かみ合い振動データにき裂の有無情報を加えることで画像化された学習用データセットを創生する方法を確立するとともに，深層構造を伴う人工知能を用いてデータの学習及びき裂有無の分類を行う実験を通して，樹脂歯車の損傷検知を行うために適切なかみ合い振動の画像サイズについて検討している．また，かみ合い振動解析を通して，き裂発生前に変化が生じる周波数帯域を明らかにし，その周波数帯域のデータを利用して健康指標を創成するシステムを開発するなど，本論文の工業的価値は非常に大きいと言える．

この開発した健康指標は使用した運転試験装置などの特性に依存するものの，樹脂歯車の歯元き裂発生の予兆および残された寿命をかみ合い振動データから推定できる手法を開発したことについては工業的および学術的にも高く評価できる．

本研究で得られた知見は，今後，歯車のヘルスマonitoring分野の発展に十分資するものと期待でき，博士の学位を授与するに値する研究であるといえる．以下に学位論文の内容に関連している5編の公表論文を示す．この内，2編が査読付き論文であり，申請者が筆頭著者となっている．残りの3編が国際会議の査読付きプロシーディングスであり，内1編の筆頭著者が申請者である．

- (1) Performance evaluation of automatic labeling system of crack length at tooth root and examination of erroneous detection, Daisuke Iba, Yusuke Tsutsui, Yunosuke Ishii, Bui Huy Kien, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science, pp. 947-965, 2019, [DOI: 10.1007/978-3-030-20131-9_94]
- (2) Relationship between rotational angle and time-synchronous-averaged meshing vibration of plastic gears, Yusuke Tsutsui, Daisuke Iba, Bui Huy Kien, Aoto Kajihata, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, Mechanisms and Machine science 88, pp. 303-312, 2021, [DOI: 10.1007/978-3-030-60076-1_27]

- (3) Crack detection of plastic gears using a convolutional neural network pre-learned from images of meshing vibration data with transfer learning, Bui Huy Kien, Daisuke Iba, Yunosuke Ishii, Yusuke Tsutsui, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, Forschung im Ingenieurwesen, Vol. 83, Issue No. 3, pp. 645-653, 2019, [DOI: 10.1007/s10010-019-00354-5]
- (4) Vibration-based plastic-gear crack detection system using a convolutional neural network - Robust evaluation and performance improvement by re-learning, Bui Huy Kien, Daisuke Iba, Yunosuke Ishii, Yusuke Tsutsui, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, Vol. 14, Issue No. 3, pp. JAMDSM0035, 2020, [DOI: 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0035]
- (5) Vibration-based early detection of plastic gear faults using Fourier decomposition and deep learning, Bui Huy Kien, Daisuke Iba, Yusuke Tsutsui, Aoto Kajihata, Yu Lei, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, The Proceeding of the International Conference on Motion and Vibration Control, 2020.15, 10027, 2020, [DOI: 10.1299/jsmeintmovic.2020.15.10027]

これらに加え、現在、以下の 1 編が査読中であり、申請者が筆頭著者となっている。

- (1) Plastic gear remaining useful life prediction using artificial neural network, Bui Huy Kien, Daisuke Iba, Yusuke Tsutsui, Daiki Taga, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Ichiro Moriwaki, Forschung im Ingenieurwesen, 2021, [under review]