

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03835

研究課題名（和文）樹脂歯車の運転試験時の形状偏差ネットワークの時間推移と歯元き裂の予兆検知

研究課題名（英文）Time variation of the shape deviation network during operation tests of plastic gears and predictive detection of tooth cracks

研究代表者

射場 大輔 (Iba, Daisuke)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：10402984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では樹脂歯車の状態を表す諸量，特に，歯元のき裂発生前に現れる歯面摩耗や歯の倒れに伴う形状変化の情報を，歯車全体で俯瞰して確認できるようにするため，形状偏差ネットワークを提案した。また，かみ合い振動に関連する情報と合わせて学習用データセットを構成し，深層構造を持つ人工知能に学習させてその状態を推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動力伝達装置で用いられる代表的な機械要素である歯車が損傷すると，機械は動力を失うことになり，その機能を果たせなくなる。そのため運転中の情報を利用して健全性を評価することが重要になる。本研究の成果は歯車の振動情報からその状態を推定することができ，損傷を回避するための一つの手段として有意義な結果が得られた。また，学習用データセットを作成する際に，歯車の形状偏差の情報を，JIS規格にはなかった各歯間関係性を表せるネットワークとして表現する手法の提案が行えた。この手法については，今後，歯車の新しい評価方法として発展する可能性があり，学術的にも大きな期待が持てる成果となった。

研究成果の概要（英文）：In this research endeavor, we introduced a shape deviation network to facilitate the examination of diverse parameters representing the condition of plastic gears, particularly focusing on information regarding tooth surface wear and shape changes, which appear before the onset of crack formation at the tooth root. Furthermore, we assembled a training dataset encompassing data pertinent to meshing vibrations and subjected it to artificial intelligence algorithms with deep architecture to estimate the gear's condition.

研究分野：機械要素

キーワード：樹脂歯車 損傷予兆検知 形状偏差ネットワーク 射出成形加工

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車を代表とする輸送機械、また生産設備や発電プラントには、高速で回転する歯車が動力伝達機構として組み込まれ、それらの損傷は大きな事故や過大な不良品発生に発展する恐れがあるため、その健全性のモニタリングは重要な課題となっている。そこで、歯車の損傷検知に関する研究が世界各国で行われており、多くの健全性評価システムが提案されてきた。その中でも回転中の歯車から発生する振動を解析する手法が古くから行われており、例えば、金属歯車対から発生するかみ合い振動を計測し、その波形を MT 法により健全・不健全な状態に分類する方法が検討されている。また、加速度センサからの情報をサポートベクトルマシンにより分類し、その健全性の評価を行う方法などがある。これらの手法では、材料の許容応力以上の曲げ応力が歯元に作用した際に発生するき裂の検知に始まり、歯面のピット発生による応答の変化を捉えることが可能である。このように金属歯車の損傷検知や損傷モード推定のための研究が盛んに行われてきた。

ところが金属歯車とは異なり、樹脂歯車の運転試験によって得られるかみ合い振動のデータの分析は進んでいない。樹脂歯車の分野では、歯元曲げ応力に起因する損傷モード、歯面の摩耗や熱の影響による特性変化(膨張・収縮や熱劣化)に加え、材料開発や繊維強化によって強度が向上するに従い、これまで無かった損傷モードが報告されるようになり、損傷形態の多様化が進んでいる。樹脂歯車の運転試験によって得られるかみ合い振動のデータを分析することで、これらの従来からの損傷形態や新しい損傷形態と照らし合わせて分類する研究は非常に少なく、樹脂歯車の運転中に振動から異常を検知し、複雑化した損傷モードを分類するための有効な方法が提案されているとは言い難い。

その一方で、機械の故障診断に応用可能な人工知能に大きな関心が寄せられている。これは、2012年に Imagenet Large Scale Visual Recognition Challenge で勝利したトロント大学の SuperVision に採用された深層学習と呼ばれる機械学習の方法が、人工知能を用いた画像認識分野の発展に大きく貢献したことを起点とし、こうした人工知能を用いて運転中の回転機械の振動データから様々な故障モードの検知が可能であることが示されてきた。

そこで申請者等は、樹脂歯車の運転試験からかみ合い振動のデータを回収するとともに、高速度カメラを用いてき裂の発生を検知し、さらにその度合いを定量化した後に振動と関連付けて大量の学習用データセットを自動的に生成するシステムを開発した。そして樹脂歯車のかみ合い振動を学習した人工知能によって運転中に発生した歯元き裂の度合いを評価する手法の提案を行い、実用上十分な精度でき裂検知が可能であることを確認してきた。そしてこの深層学習を伴う人工知能を用いた樹脂歯車のき裂検知システムの性能を評価する中で、興味深い事象が確認された。それは、運転試験中に高速度カメラによって目視でき裂の発生を確認する前に、システムがき裂の発生を誤って検知することがあり、その後、試験を継続すると比較的短時間で試験対象歯車の歯元にき裂が発生するという事象であった。これは、き裂発生をラベルとして振動情報を学習した人工知能が、き裂発生以外の要因で変化するかみ合い振動成分を誤って学習し、その変化をき裂発生前に捕らえていることを示唆している。これは、き裂発生の「予兆」検知に繋がる発見であったが、その事象がなぜ発生するのか、どのようなかみ合い振動モデルでその現象を説明できるのか、また、この事象が別の運転試験機でも同様に生じるものなのか理解が進んでいなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、樹脂歯車を対象に、まず運転試験において歯元なき裂発生前に現れる歯面摩耗や歯の倒れに伴う「歯車の形状変化」に関連する情報を回収してネットワーク理論を用いて定量化する。そしてその歯形形状の変化が、計測したかみ合い振動の周波数成分の変化に与える影響を明らかにする。さらに、こうして回収された歯車の形状変化情報がかみ合い振動情報に与えることで学習用教師データを創生し、深層構造を伴う人工知能に学習させる。そしてその人工知能が歯車の振動情報のみから歯元なき裂発生の「予兆」検知が可能であるか検証する。歯面摩耗や歯の倒れに伴う歯形の変形について、ネットワーク理論を用いることで、従来から歯車精度の分類に使用される歯形・歯すじ・ピッチ偏差(誤差)についてはノード(結束点)の情報として、それら歯毎の偏差間の相対的な関係をノード間のエッジ(辺)の情報として解析する手法を開発し、その形状偏差ネットワークの時間推移を観察することによって、歯車の形状変化の要因を分離してその度合いを定量化していく。さらに歯形の変形を考慮し

たかみ合い振動を表す時変調和振動モデルを提案し、その周波数領域での特性を考察することで、変形度合いと振動数成分の関連付けを試み、実際のかみ合い振動データに含まれるそれらの振動数成分の特徴量がき裂の予兆検知に有効であるかどうかについて深層学習を伴う人工知能を通して検証する。

3. 研究の方法

本研究ではまず、ポリアセタール(POM)製歯車の運転試験と歯車測定機による歯形形状測定を実施する。樹脂歯車の回転速度と負荷として与えるトルクを変更した運転試験を行い、運転中のかみ合い振動の計測と、運転開始前と終了後に歯車測定機による形状測定を実施することで人工知能に学習させるためのデータとなる情報資源の回収を行う。続いて、運転試験によって発生した歯車の形状変化、特に歯元なき裂発生前に現れる歯面摩耗と歯の倒れが、かみ合い振動に与える影響が大きいとし、それら形状変化要因の分離方法の検討を行う。ここでは、相手歯車とかみ合っていない歯面から歯の傾き度合いを示す指標である歯形勾配偏差を導出し、反対側のかみ合っている歯面(左歯面)の傾き(歯の倒れ)による変形量を推定する。そして左歯面の歯形偏差からその推定量を減算し、残された偏差を摩耗による変形量として抽出する。

また、ネットワーク理論の考え方を導入することで、各歯をノード、各歯間の相関情報をエッジと見做して相互接続することで歯車の形状偏差情報をネットワーク化する。歯すじ偏差・歯形偏差・ピッチ偏差のネットワークを導出することで、円周上に分布した各歯において運転時間の経過とともに様々な要因で進んでいく歯面の摩耗、歯の倒れによる形状変化を、歯車全体を俯瞰しながら追跡できる評価指標の導出を行う。さらに、運転時間の増加に伴い変化する歯車形状が影響を与えるかみ合い振動の周波数成分を明らかにし、取得した運転試験における振動データに、歯車の全体形状を俯瞰した偏差ネットワークから抽出した形状変化指標をラベルとして与え、学習用のデータを構成する。そしてかみ合い振動から抽出した周波数成分の振幅と位相情報をグレースケール画像に変換し、画像認識用の人工知能に学習させる。そして、最後に歯車の運転試験を新たに実施し、学習した人工知能に対してかみ合い振動の情報のみを与えてき裂の予兆検知が可能であるか実証実験を行う。

4. 研究成果

本研究では樹脂歯車の状態を表す諸量、特に、歯元なき裂発生前に現れる歯面摩耗や歯の倒れに伴う形状変化とかみ合い振動に関連する情報を回収して解析し、それらの関係を明らかにすることを目的とし、さらに、回収・解析した情報に歯車の特性を考慮した前処理を施して学習用データセットを創生し、深層構造を持つ人工知能に学習させることで歯車の振動情報のみから歯元なき裂発生の「予兆」検知が可能であるか検証することであった。

初年度は、ポリアセタール(POM)製歯車の運転試験を実施し、かみ合い回数の増加とともに変化する歯形形状の測定を歯車測定機により実施した。運転試験の条件として、1. 高トルク・低回転速度、2. 低トルク・高回転速度、3. 中トルク・中回転速度を用意し、歯の倒れが進む実験と歯面の摩耗が進む実験、そしてその中間の実験を実施した。それぞれの運転試験においてかみ合い回数を五段階に分けて試験を実施し、かみ合い回数の増加とともに変化する歯形形状を計測した。計測したデータについて、歯の倒れについては、相手歯車とかみ合っていない非作用歯面側の歯形偏差データを利用して歯形勾配偏差を評価した(図1)。歯面の磨耗については作用歯面の歯形偏差データの歯先からピッチ点近傍までのデータは用いずに、ピッチ点から歯元側の歯形偏差データにおいて歯元側の測定開始点とピッチ点を運転開始前に測定したデータと一致させた後に、両歯形偏差曲線で囲まれた面積に歯幅を乗じることで求めた体積の全歯の総和から密度を考慮して導出した質量が、電子天秤で測定した質量の損失分と定性的にも定量的にも良く一致することが確認でき、磨耗量の定量化に利用できることがわかった。さらに、計測した各歯の歯形・歯すじ偏差データから相関係数を求め、各歯をノード、そして相関係数を重みとする偏差ネットワークを導出する方法を提案した。

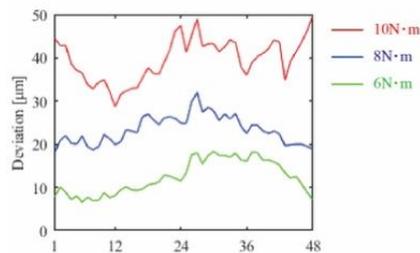


図1. 負荷トルクと歯形勾配偏差

令和 4 年度は、歯の倒れと歯面摩耗の度合いが異なるように条件を変えて樹脂歯車の運転試験実施し、き裂発生前の形状が変化し始めた樹脂歯車を準備した。そして、異なる歯の倒れと歯面摩耗の度合いを有する歯車に対して、今度は同条件で運転試験を実施することで、かみ合い振動データを生成した。そのデータに対して歯車測定機によって計測して評価した歯の倒れと摩耗の指標(図 2)を与えることで正解付きの学習用データセットを用意した。かみ合い振動データは周波数領域で画像化し、形状変化の度合いがかみ合い振動成分に与える影響を明らかにするため、周波数帯域毎に異なる学習用データセットを人工知能(VGG16)に学習させて正答率を調べた(図 3)。また、運転試験前の樹脂歯車の形状偏差データをネットワーク化した。特に、歯すじ偏差間の相関係数を重みとした歯すじ偏差ネットワークを調べたところ、ネットワークの隣接行列に周期的なパターンが生じていることが確認できた。歯車の製作工程と得られたパターンを詳細に調べたところ、射出成形加工時の影響が歯すじ偏差ネットワークに現れていることが確認でき、加工時の履歴がネットワークから評価できる可能性を示唆していることがわかった(図 4)。

最終年度である令和 5 年度は、当初はかみ合い振動の時変調和振動モデルの周波数解析を行い、運転時間の増加に伴い変化する歯車形状が影響を与えるかみ合い振動の周波数成分を明らかにすることと、運転試験における振動データに、歯車の全体形状を俯瞰した偏差ネットワークから抽出した形状変化指標をラベルとして与え、学習用のデータを構成画像認識用の人工知能に学習させてき裂の予兆検知が可能であるか実証実験を行う予定であったが、前年度に提案した歯車の形状偏差をネットワークとして表現する方法に関連した研究において大きな進展があり、そちらに重点を置いて進めることとなった。具体的には、各歯の歯面に残された仕上げ加工時のツールマークが有する特性を歯すじ偏差曲線間の相互相関関数を計算することでネットワークを構成して評価する方法を提案した(図 5)。また、歯すじ偏差間の正の相関係数をリンクとした歯すじ偏差ネットワークのグラフラプシアンに対して固有値解析を行い、ワークの設置誤差などの加工時の問題を固有値と固有ベクトルで判別できる可能性を見出すことができた。さらに、歯元近傍を FT-IR による分子構造解析した結果をネットワーク化することで、射出成形された樹脂歯車のウェルドライン近傍で配向度が異なることを視覚化することに成功した。

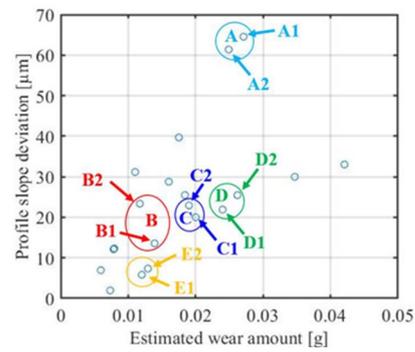


図 2. 歯形勾配偏差と推定摩耗量

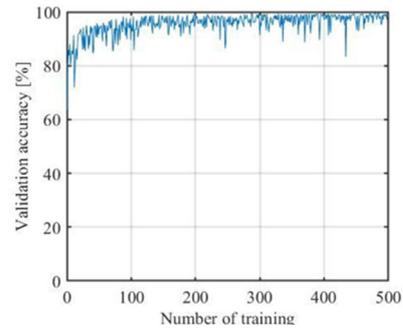


図 3. VGG16 による傾き・摩耗推定の正答率

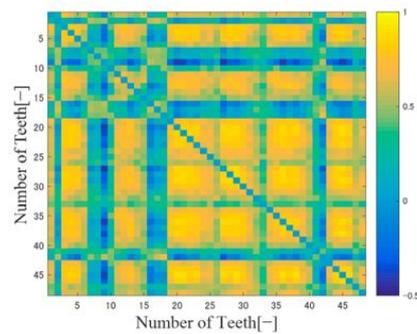


図 4. 射出成形歯車の歯すじ偏差ネットワーク

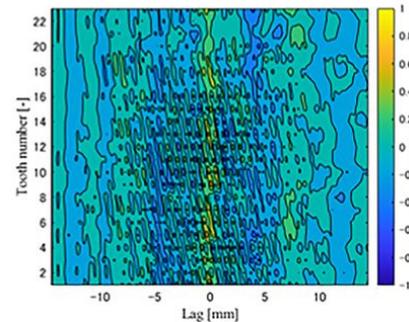


図 5. 歯研仕上げ歯車の歯すじ偏差曲線間の相互相関関数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 KAWANO Kunitoshi、IBA Daisuke、URIU Koichiro、MORIWAKI Ichiro | 4. 巻 88 |
| 2. 論文標題 Examination of teaching data for Hobbing-Machine-Diagnosis system (Comparison of classification performance of helical gears and spur gears and comparison of matrix images by hobbing simulation and actual hobbing) | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese) | 6. 最初と最後の頁 22 ~ 00132 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00132 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Kien B. H.、Iba D.、Tsutsui Y.、Taga D.、Miura N.、Iizuka T.、Masuda A.、Moriwaki I. | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Plastic gear remaining useful life prediction using artificial neural network | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Forschung im Ingenieurwesen | 6. 最初と最後の頁 1-17 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10010-021-00557-9 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Low Jing Chong、Iba Daisuke、Yamazaki Daisuke、Seo Yuichiro | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Shape Deviation Network of an Injection-Molded Gear: Visualization of the Effect of Gate Position on Helix Deviation | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Applied Sciences | 6. 最初と最後の頁 2013 ~ 2013 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app14052013 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yamazaki Daisuke、Iba Daisuke、Low Jing Chong、Moriwaki Ichiro | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 Kreuzkorrelationsanalyse zwischen Zahnprofil- und Schrägungsabweichungen | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Forschung im Ingenieurwesen | 6. 最初と最後の頁 1009 ~ 1017 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10010-023-00696-1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Jing Chong Low, Daisuke Iba, Daisuke Yamazaki and Shozo Ueda |
| 2. 発表標題 Shape Deviation Network of an Injection-Molded Gear : Visualization of the effect of Gate P0sition on Tooth Helix Deviation |
| 3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and tribology (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Daiki Taga, Daisuke Iba, Suzuka Yamauchi, Mitsuo Kaneko, Nanako Miura and Arata Masuda |
| 2. 発表標題 Estimation of Wear by Analyzing Meshing Vibration Using Artificial Intelligence |
| 3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and tribology (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山崎 大輔、射場 大輔、塩田 篤、植田 昌蔵、大久保 光、森脇 一郎 |
| 2. 発表標題 歯形・歯すじ偏差曲線間の相互相関関数による解析 前処理が解析結果に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会，関西学生会2021年度学生員卒業研究発表講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 塩田篤，射場大輔，植田昌蔵，森脇一郎，大久保光 |
| 2. 発表標題 はすば歯車の歯すじ偏差曲線間の相互相関解析 |
| 3. 学会等名 第20回機素潤滑設計部門講演会 (MDT2021) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 多賀 大希、射場 大輔、Bui Kien、大久保 光、三浦 奈々子、飯塚 高志、増田 新、森脇 一郎 |
| 2. 発表標題 非作用歯面の歯形勾配偏差から推定した歯の倒れとかみ合い振動の周波数成分の関係 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Taga Daiki、Iba Daisuke、Bui Huy Kien、Tsutsui Yusuke、Miura Nanako、Iizuka Takashi、Masuda Arata、Moriwaki Ichiro |
| 2. 発表標題 An improvement of visualized images from vibration for plastic gear early failure detection using convolutional neural network |
| 3. 学会等名 Proc. SPIE 11593, Health Monitoring of Structural and Biological Systems XV |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山崎 大輔、射場 大輔、Low Jing Chong、河野 邦俊、森脇 一郎 |
| 2. 発表標題 ネットワーク理論を用いた歯すじ偏差曲線の評価（ワークの取付け誤差がグラフラプラシアン固有値に与える影響） |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2023年度年次大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 瀬尾 祐一郎、射場 大輔、LOW JING CHONG、山崎 大輔 |
| 2. 発表標題 歯たけ方向に異なる位置で測定した歯すじ偏差曲線から構成される歯面偏差ネットワーク |
| 3. 学会等名 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会 2024 |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|