

氏 名	かわの くにとし 河野 邦俊
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 0 8 8 号
学位授与の日付	令和 5 年 3 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	ホブ盤診断システムの開発に関する研究
審 査 委 員	(主査)教授 射場 大輔 教授 増田 新 准教授 山口 桂司 京都工芸繊維大学名誉教授 森脇 一郎

論文内容の要旨

円筒歯車歯切りの代表的な工法にホブ切りがある。ホブ切りは、被加工物となる鋼丸棒と「ホブ」と呼ばれる工具を同期させながら歯を削り出す、創成運動を利用した工法である。したがって、加工時に存在した問題が切り出した歯の形状にどのような偏差を与えるかの解析は比較的容易である。しかしながら、反対に、歯の形状偏差から加工時の問題を明らかにすることは困難である。これまで、数多くのホブ切りシミュレーションが開発され、ホブ切り後の歯の形状偏差を推定することは実用に耐えうるレベルまで可能になった。しかしながら、そこでは、ホブ切りの専用機、ホブ盤が有する被作物と工具との創成運動の誤差が考慮されていない。そこで、本研究では、まず、創成運動の誤差をも考慮できるホブ切りシミュレーションプログラムを開発し、種々の運動誤差に対して歯の形状偏差がどのように変化するかについて多くのデータを取得できるようにした。さらに、そのデータを用いて、歯の形状偏差から創成運動の誤差を推定する人工知能モデルを構築し、歯の形状偏差の測定結果からホブ盤の創成運動の精度を診断する「ホブ盤診断システム」の開発を行った。

本論文は 6 章から構成されている。第 1 章は緒論であり、研究の背景、平歯車やはすば歯車の各切削加工の特徴、ホブ切りされた歯車の歯車精度に関する過去の研究を示し、残された解決すべき課題を明らかにしている。そして本研究の目的と目標について論じている。

第 2 章は人工知能に学習させるデータを作成するために開発したホブ切りシミュレーションについて述べている。一般的なホブ切りシミュレーションではワークとホブカッターを解析の対象とし、それらの運動によって生成される歯面形状を出力するものとなるが、ここで開発するシミュレーションは、ホブ盤全体に関連する運動箇所から発生する誤差が歯車の加工に与える影響を取り扱えるようにしている。シミュレーションで用いる座標系を設定し、座標変換を用いてワークとカッター等の運動を表現することでホブ歯面を計算している。また、ホブの取り付け誤差やホブ盤の運動誤差など、本研究で必要となる理想とは異なるホブ切り加工をした場合についてのホブ切りシミュレーションの適用手法についても述べている。そしてホブ切りシミュレーションの結果から歯形偏差や歯すじ偏差を導出できることを確認している。また、シミュレーションと同

等の条件で実際のホブ切りを行い、実加工時に発生する問題点やその補整手法などについて検討した。実際にホブ切りされた歯車については、ホブカッターの精度が加工された歯車の歯形形状に大きな影響を与えることを明らかにしている。そこで、実加工の各条件における歯形偏差線図と最善状態における平均歯形偏差線図の差分をとることにより、ホブカッターの精度の影響を除去する手法について提案した。これによりホブ切りシミュレーションを用いて得られた歯車の歯形偏差や歯すじ偏差が妥当なものであることを確認した。

第 3 章では画像分析用人工知能を用いて歯面の形状偏差からホブ加工時の問題を解析するために、学習用のデータを創成する方法について述べている。歯車の歯形・歯すじ偏差のデータを圧縮するために、各歯間の偏差線図の類似具合を相関係数として表現する手法を提案した。また、導出した相関係数を行列（マトリクス）として並べ、その値に応じてグレースケールで色分けすることで、人工知能に用いることが可能な画像とする手法について述べている。そしてシミュレーションにより得られた歯車データを提案した手法によって画像化し、それぞれのシミュレーション条件により異なる特徴を持った画像が得られることを確認している。

第 4 章では、ホブ盤診断システムにて用いるべき歯車について検討し、その諸元でホブ切りシミュレーションを行い、その結果を画像で表現している。その結果、はすば歯車では類似の画像となったホブ盤の誤差運動の組み合わせにおいても、平歯車の場合はそれぞれ別の特徴を持った画像を得ることができることが確認された。しかし、平歯車における画像では、理想状態とホブカッターの取り付け振れがある場合を区別することができないことが確認された。そのため、ホブ切り時の問題点を判別するためには、二つ以上の諸元の歯車を用いる必要がある可能性が高いことを明らかにしている。また、実際にホブ切りの行った歯車の歯形偏差や歯すじ偏差についての相関係数を用いて画像化し、ホブ切り時の完全に除去できない誤差運動が画像に及ぼす影響を明らかにしている。

第 5 章では、ホブ盤診断システムにて用いる人工知能について述べている。そして実際の人工知能を用いてホブ切りされた歯車の判別テストを行っている。人工知能に学習させる教師データについて複数パターンを用意し、どのような教師データを用いると判別精度が良くなるか、比較を行った結果、教師データ作成の際には純粋な 1 つの誤差運動だけでなく、その他の誤差運動をすこしだけノイズとして含ませることで判別精度が向上することを確認している。また、複数の誤差運動を有したホブ盤で加工された歯車について判別精度を向上させる教師データを作成する際にも複数の誤差運動を有したケースを含ませる必要があることを明らかにしている。

第 6 章は結論である。本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について述べた。ホブ切りされた歯車の歯形偏差及び歯すじ偏差を画像化することで、人工知能を用いてホブ切り時の問題点を判別することが可能であることを示している。

論文審査の結果の要旨

本論文では、外歯車の歯の形状を加工するための代表的な加工法の一つであるホブ切り加工において、加工された歯車の形状偏差を表す歯面の歯形および歯すじ偏差データからホブ切り加工時に生じた問題を人工知能によって診断するシステムの開発について述べられている。

まず、本研究では人工知能用の学習データを作成するために、ホブ切り時の誤差運動を考慮したホブ切りシミュレーションを開発している。これまでに開発されたホブ切りシミュレーションでは加工対象（ワーク）とと切れ刃（ホブカッター）のみを解析の対象としていたが、ここで開発されたシミュレーションは加工機であるホブ盤全体に関連する運動に生じた誤差が歯車の加工に与える影響を計算できるようになっている。これを用いてワーク、カッター、ホブ盤において誤差運動が存在する場合に創成される歯車の歯形形状を計算し、その結果と実際のホブ切り加工で得られた歯車の歯形・歯すじ偏差の結果が類似していることを示し、シミュレーションの有効性を確認している。次に、画像分析用畳み込みニューラルネットワークを用いて歯面の形状偏差からホブ加工時の問題を解析するために、学習用のデータを創成している。歯形および歯すじ偏差データから、特徴量として各歯に生じた偏差間の類似具合を示す相関係数を計算し、その結果を用いて学習用の画像データを生成する方法を示した。これによってホブ切り時の問題ごとに異なった特徴を有する画像を、サイズの小さなデータとして保存している。そしてシミュレーションの結果から得られた画像を教師データとして画像判別用の人工知能に学習させ、実際にホブ盤を用いてホブ切りされた歯車から得られた画像データを判別させている。これらの結果よりホブ切りされた歯車の歯形、歯すじ偏差からホブ切り時のホブ盤の問題点を推測することを可能としている。

開発されたシステムは、ホブ盤を製造する加工機メーカーが出荷前点検の際に利用することで組み立て時の組み付け誤差を確認するために利用することを想定している。また、それ以外の利用方法として、客先の歯車の生産メーカーへホブ盤を出荷した後のトラブルが生じた際に、加工された歯車の形状データを送信してもらえば、提案するシステムを利用してデータの解析を実施することでホブ盤の異常箇所が推定可能となる。これにより現場に熟練技術者を派遣し、運転試験や計測によって問題点を洗い出しするための時間が削減可能となり、ホブ盤の稼働率を大幅に上げることができる。これらは加工機メーカーと生産メーカーの双方にとって有益であり、システムが実現できればその工学的価値は非常に高い。現在は、決まった歯車諸元での対応、検知できる異常については制限があるが、今後の研究の進展によって広くシステムの普及が期待できる。

以上のように、本研究は工学的・工業的に非常に価値のあるものである。本論文の内容は、以下に示す3編の学術論文として公表されており、全ての論文の筆頭著者が申請者である。

査読付き論文

- (1) 人工知能を用いたホブ盤診断システム（ホブ切りシミュレーションによる学習データの生成とネットワーク表現によるデータ圧縮）、河野邦俊，射場大輔，瓜生耕一郎，野田英克，井上大暉，森脇一郎，日本機械学会論文集，86巻（886号），p.20-00026, 2020.
- (2) ホブ盤診断システムのための歯車精度表現手法（ネットワーク表現を用いたマトリクス画像の表現可能範囲）河野邦俊，射場大輔，瓜生耕一郎，野田英克，井上大暉，森脇一郎，日本機械学会論文集，87巻（902号），p.21-00220, 2021.
- (3) ホブ盤診断システムのための教師データに関する検討（はすば歯車と平歯車の分類性能比較及びホブ切りシミュレーションと実加工によるマトリクス画像の比較），河野邦俊，射場大輔，瓜生耕一郎，森脇一郎，日本機械学会論文集，88巻（912号），p.22-00132, 2022.

なお，次の論文は投稿準備中であり，第 5 章の基礎となっている．

（４）教師データの構成とホブ盤診断システムの判別制度に関する検討，河野邦俊，射場大輔，瓜生耕一郎，森脇一郎，日本機械学会論文集，投稿準備中．