

(論文内容の要旨)

本論文は、乗用車や風力発電装置などに用いられるインボリュートヘリコイド歯車の歯面形状の測定に用いる、歯車測定機の精度保証体系の高精度化のために必要とされている、アーティファクトの高精度校正法、新たな高精度アーティファクトおよび測定法の提案、歯車測定機における誤差要因の影響調査・推定、ならびに不確かさの評価についてまとめたもので、次の9章からなる。

第1章は序論であり、歯車歯面形状測定の精度保証体系について述べ、現状の課題を明らかにして、本研究の目的・概要を述べている。

第2章では、歯車歯面形状測定を論ずる上で基本となる、歯車歯面の形状偏差の定義およびその測定方法を説明している。また、一般的に用いられている歯車歯面形状測定機およびアーティファクトの紹介を行っている。

第3章では、歯車の歯形測定の校正に用いられるインボリュートアーティファクトの歯面形状を高精度に計測する3つの方法を提案した。はじめに、インボリュート曲線の幾何学的性質を利用し、レーザ干渉変位計測を用いて直接的に歯面形状を測定するアーティファクト転動式測定法を提案した。測定原理を説明し、測定装置を構築し、アーティファクトの測定が可能であることを確認した。すべりを生じない駆動法を開発し、より再現性の高い測定を実現した。次に、超高精度2.5次元測定機を用いたアーティファクト測定法を提案した。これについて、アーティファクト測定法を確立し、三次元的な測定結果を歯形曲線に変換するプログラムを作成した。これらを用いて、実際の測定によりアーティファクトの歯面形状ならびに歯面上の微細な凹凸を測定可能であることを確認した。さらに、シミュレーションプログラムを用いた多数回の仮想測定により不確かさの評価を行った。次に、円筒面測定用フィゾー干渉計を用いた歯形形状測定を提案し、三次元的な測定結果を歯形曲線に変換するプログラムを作成した。これについて、測定実験を行い、測定および歯形曲線への変換が可能であることを示した。最後に、高精度に校正された三次元座標測定機および歯車歯面形状測定機によるインボリュートアーティファクト測定を実施し、その測定結果と本研究で提案した3つのアーティファクト校正法による測定結果が良く一致していることを確認した。これらにより、インボリュートアーティファクトを高精度に測定できる可能性があることを確認した。

第4章では、歯すじ測定用アーティファクトとして傾斜平面を持つウェッジアーティファクトの提案を行った。ウェッジアーティファクトの概念と構造、その利点について述べた。ウェッジアーティファクトを歯すじ測定する場合の数学モデルを構築し、これを用いてコンピュータ上での仮想測定を行った。これにより、ウェッジアーティファクトの歯すじ測定面と対象とするヘリックスが近い形状となるように歯すじ測定面の傾き角を選択すれば、理論歯すじ測定結果はS字形状となることを示した。また、ウェッジアーティファクトの歯すじ測定面の傾き角と、歯すじ測定円筒上でのねじれ角、および測定円筒の半径が理論歯すじ測定結果に及ぼす影響を明らかにした。

第5章では、歯車歯面形状測定において各種誤差要因が測定に及ぼす影響を

調査するため、仮想空間上で歯車歯面形状測定を行うシミュレーションプログラムであるバーチャルギヤチェッカーを提案した。現実の歯車歯面形状測定機と同様の機構、制御系を仮想空間に構築し、測定結果に影響を及ぼす各種誤差要因を考慮して、仮想歯車歯面形状測定を行うプログラムを構築した。歯車歯面形状測定機の誤差要因を定義し、これらを考慮した測定状態を数式として表現した。これを用いて、プローブ先端球位置誤差が歯車歯面形状測定結果に与える影響を定量的に評価した。

第6章では、高精度に製作された4歯のインボリュートヘリコイドアーティファクトを歯形、歯すじ測定し、その測定結果を平均化することで、取り付け誤差の影響を低減する方法を提案した。バーチャルギヤチェッカーを用いて4歯仮想歯車歯面形状測定を行うとともに、実際の歯車歯面形状測定機を用いて測定を行った。バーチャルギヤチェッカーによる仮想測定結果と歯車歯面形状測定機による実測結果より、提案する平均化による取り付け誤差の影響の低減法が、設置時のアーティファクトの偏心・傾きがある条件下で有効であることが理論的、実験的に確認できた。これにより、平均化による取り付け誤差の影響低減法の有効性を確認した。

第7章では、統計的手法による歯車歯面形状測定機の誤差推定法を提案した。ダブルボールアーティファクトによる校正において回帰式の推定を行い、校正対象とする誤差要因の選定の際には相関の強い誤差要因を含めないようにすべきであることを明らかにした。ダブルボールアーティファクトによる校正の場合にはx、y方向のプローブ先端球の位置誤差が校正対象誤差要因として適当であることを明らかにし、これに即した校正手順を構築した。不確かさを考慮した場合でも、回帰分析によりある程度の精度で誤差要因の推定を行えることを確認し、統計的手法を用いた誤差要因推定法の有効性を確認した。

第8章では、VGCを用いて評価対象とする歯車歯面形状測定の状態を仮想空間上に再現し、モンテカルロ法を用いた多数回繰り返し仮想測定を行うことで不確かさを算出する方法を提案した。本方法を用いることで、繰り返し測定による不確かさ算出に比べて短時間で不確かさ算出が可能であることを確認した。提案した方法を用いた不確かさ算出を行い、また、同一条件下では、仮想被測定歯車のねじれ角が大きいほど算出される不確かさが大きくなることを明らかにした。

第9章は結論であり、本論文で得られた結果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、乗用車や風力発電装置などに用いられるインボリュートヘリコイド歯車の歯面形状の測定に用いる歯車測定機の精度保証体系の高精度化のための技術を提案している。歯車測定機の校正に用いられるアーティファクトの高精度校正法、新たな高精度アーティファクトおよび測定法の提案、歯車測定機における誤差要因の影響調査と誤差推定法、ならびに測定不確かさの評価についてまとめ、次の知見を得ている。

(1) 3種類の新たなアーティファクト校正法を提案し、その原理を示すとともに、校正装置の確立および不確かさの評価を行っている。これにより、従来法では実現できない高精度測定や表面微細形状の計測を実現できることを示した。

(2) 高精度な平面を用いて歯車測定機の歯すじ測定精度を評価するウェッジアーティファクトを提案した。測定の数学モデルを構築し、アーティファクトの設計指針を示した。

(3) 歯車測定機の誤差が測定結果に与える影響を調査するため、実際の歯車測定機に対応したシミュレーションプログラムであるバーチャルギヤチェッカーを提案した。これを用いて各種の誤差要因が測定結果に与える影響を解析した。

(4) アーティファクトの取り付け誤差が測定結果に与える影響を低減するための平均化法を提案し、実験によりその有効性を確認した。

(5) バーチャルギヤチェッカーを用いた回帰分析による歯車測定機の誤差推定法を提案した。これを誤差を有する仮想的な歯車測定機の誤差推定に適用し、その有効性を確認した。

(6) バーチャルギヤチェッカーを用いたモンテカルロ法による歯車測定の不確かさ算出法を提案し、これにより不確かさ算出作業時間の低減を実現した。

本論文で得られた成果は、アーティファクトの高精度校正法など、歯車の精度保証体系の高精度化に多大な貢献をするものであり、量産される歯車の品質保証精度の向上に寄与するものと考えられる。

本論文は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年1月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。