

氏名	たちかわ ともかず 立川 友和
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第830号
学位授与の日付	平成29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	Analytical Models on Optimization of Internal Gear Skiving Conditions in Automobile Production (自動車用内歯歯車のスカイビング加工における加工条件を最適化するための幾何学モデル)
審査委員	(主査)教授 森脇一郎 教授 太田 稔 准教授 射場大輔

論文内容の要旨

本論文は、内歯歯車の歯切り加工法の1つであるスカイビング加工の量産実用化に際して解決しなければならない各種問題を、簡便な幾何学計算によって効率よく解決している。スカイビング加工は、新しい工法であるため、その工具の設計法の提案から始め、工具設計パラメータの最適化、加工条件が歯車精度に与える影響や加工中の振動抑制を目的とした切削負荷を解析するためのモデルを提案し、実験によりこれらモデルの有用性について検討した。さらに、これらの解析モデルを活用することによってスカイビング加工法の諸課題を効果的に解決し、自動車用内歯歯車の加工法として実用化した。

本論文は全7章から構成されている。第1章は序論となり、参考文献を紹介して比較することにより本研究に関わる研究背景と研究目的と意義について述べている。

第2章は、本研究で取り扱う工具の設計方法を提案している。まず、噛み合い方程式を解くことにより正とした内歯歯車と共役な歯面を離散的な3次元点群データとして計算する手法について述べた。次に、点群データにラグランジュ補間を施し、すくい面を構成する平面との交線を求め、工具の切れ刃輪郭を求める方法を示した。最後に、工具の製作を容易にするため、任意の形状を有した切れ刃輪郭をインボリュート形状に近似する方法を提案し、実際の工具試作と試加工によりその有用性を検討している。

第3章は、工具の主要な設計パラメータが刃具寿命に与える影響について理論的に考察を行っている。スカイビング加工の大きな課題の一つとして、工具寿命の向上があるため、工具寿命の向上に繋がる工具の設計法が大切であることを述べている。次に、基本的な切れ刃の計算方法を再度示し、傾斜切削モデルに基づいてスカイビング工具の瞬時の切り込み量、逃げ角及びすくい角を計算する方法について述べている。最後に、具体的に軸交差角とオフセット量を複数水準変化させた場合の切り込み量、逃げ角及びすくい角を計算・評価し、工具寿命向上の可能性を論じている。

第4章は、加工条件の一つである工具の送り速度が歯車精度に与える影響を見積もるための解析モデルを提案した。まず、過去の参考文献を参照しながら、新工法の送り速度決定の

難しさと必要性を示している。その後、具体的な方法として、前章の方法で設計された工具に送りを与え、実際の加工を模し被削材に創成される新生面の形状を幾何学的に計算する方法を示している。続いて、歯形形状誤差や歯すじ形状誤差を評価する手法を提案し、実験による検証を通して手法の有用性に関して考察した。

第5章は、スカイビング工具の製作誤差であるピッチ誤差及び取り付け誤差に起因する振れが歯車精度に与える影響について解析と実験により検討している。スカイビングの量産実用化を行うに当たっては、所望の精度を有した内歯歯車を加工するために許容できる工具のピッチ誤差や振れを見極めることが重要である事を示している。次に、振れを記述する項と工具のピッチ誤差を記述する項を考案し、前章の送り速度の影響の解析に用いたモデルにこれらの項を追加することによって、ピッチ誤差や取り付け誤差の歯車精度への影響を解析するモデルを提案している。本モデルのピッチ誤差は、切れ刃の円周方向へのランダムな微小変位と考え、モンテカルロ法により実現している。最後に、実験との比較を行い、提案した解析モデルが有用である事を確認した。

第6章は、スカイビング加工中に発生する振動の抑制を目的に、切削抵抗を幾何学的に計算する方法を提案している。加工中の振動を抑制することが重要にも拘わらず、スカイビング加工においては切れ刃の姿勢が刻々と変化し、それぞれ異なった姿勢の複数の切れ刃が被削材と同時に噛み合っているため切削抵抗も複雑に変化し、かつその計算方法も非常に困難である事を、参考文献を取り上げて示している。次に、その解決策として切り込み量を表すベクトルの和を切削抵抗とみなす解析モデルを提案し、任意の工具回転数で生じる切削抵抗の変動周波数を計算する方法を提案している。さらに、設備の応答周波数を考慮する事で、共振を回避し、加工中の振動が効果的に抑制できる事を確認した。その結果、加工した内歯歯車の精度の改善も確認した。

第7章は、まとめに相当し、これまで取り組んできた工具の設計法、工具設計パラメータの最適化技術、加工条件が歯車精度へ与える影響や加工中の振動抑制を目的とした切削負荷の解析モデルを活用することによって、スカイビング加工の諸課題を効果的に解決し、自動車用内歯歯車の加工法としてスカイビングを実用化した例を示した。

論文審査の結果の要旨

自動車用歯車の生産において、カスタマーの要求を考慮した多品種少量生産への対応が急務となっており、特に内歯車の生産で従来用いられてきた少量生産に向くが生産効率が悪いギヤシェーパ加工に替わる加工法が必要とされてきた。スカイビング加工は、高精度な歯車を少量だけ高効率に生産することに向いた加工法であるが、刃具の歯形形状が通常のインボリュート形状と異なり、刃具の設計・製作が大きな課題であった。また、スカイビング加工は、量産の実用化がなされたことがなく、加工時の振動が少なく精度の高い歯車を生産するために必要な加工条件に関する知見が不足していることも課題であった。

本論文は、これらの課題を解決することで、スカイビング加工による内歯車の量産実用化を目的としている。まず、自動車用内歯車のスカイビング加工で用いる刃具の幾何学解析モ

デルを提案し、その解析モデルを利用した刃具の設計手法を確立して刃具形状の最適化を図った。次に刃具の取り付け誤差や製作誤差が歯車精度へ与える影響を解析し、加工実験によって検証を行っている。さらに加工時の切削負荷を解析するためのモデルを提案した後、加工設備の固有周波数を考慮して共振を避ける加工条件をモデルから導出し、実際のスカイビング加工の実験を通して提案した手法の有効性を確認している。そして、最後にスカイビング加工による内歯車の量産化を行っている。

本研究で得られた知見は、今後、内歯車の生産現場において広く普及することが見込まれる内容であり、博士の学位を授与するに値する内容となっている。以下に学位論文の内容に関連している6編の公表論文を示す。

公表論文

- (1) Ichiro Moriwaki, Morimasa Nakamura, Tomohiro Hasegawa, Masami Funamoto, Kouichiro Uriu, Takanori Murakami, Tomokazu Tachikawa, Eiri Nagata, Nobuaki Kurita, Yoshinori Kobayashi, Tooth Geometry Design of Cylindrical Skiving Cutter for Internal Gears, VDI-Berichte 2199.1, pp.329-340, 2013.
- (2) Ichiro Moriwaki, Tsukasa Osafune, Morimasa Nakamura, Masami Funamoto, Koichiro Uriu, Takanori Murakami, Eiri Nagata, Nobuaki Kurita, Tomokazu Tachikawa, Yoshinori Kobayashi, Cutting Tool Parameters of Cylindrical Skiving Cutter with Sharpening Angle for Internal Gears, ASME, Journal of Mechanical Design, Accepted.
- (3) 立川友和, 栗田信明, 中村守正, 森脇一郎, 内歯歯車のスカイビング加工に関する研究(送り速度が加工精度に与える影響), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.831, 2015, p.15-00105; 11 pages.
- (4) Tomokazu Tachikawa, Nobuaki Kurita, Morimasa Nakamura, Daisuke Iba, Ichiro Moriwaki, Calculation Model for Internal Gear Skiving With a Pinion-Type Cutter Having Pitch Deviation and a Run-Out, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 10: ASME 2015 Power Transmission and Gearing Conference, Paper No. DETC2015-46402, pp. V010T11A033 ; 9 pages.
- (5) Tomokazu Tachikawa, Daisuke Iba, Nobuaki Kurita, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, Basic study on calculation of cutting forces useful for reducing vibration in skiving, ASME, Journal of Mechanical Design, Submitted.
- (6) Eri Nagata, Tomokazu Tachikawa, Yoshitomo Nakahara, Nobuaki Kurita, Morimasa Nakamura, Daisuke Iba, Ichiro Moriwaki, Gear Skiving for Mass Production, Proceedings of JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, 2017, Accepted.