

京都大学	博士（工学）	氏名	河野 大輔
論文題目	計測融合加工システムを用いた工具刃先運動の転写率の同定		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、サブミクロンオーダーの形状・寸法精度が必要な光学部品や金型の高精密切削加工を高速に行うために、加工精度を支配する工具刃先運動の高精度化手法および刃先運動の加工面への転写の定量化手法を論じた結果をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、高精密加工が要求される背景と切削加工法の高精密化に関する従来の研究について考察し、これらの問題を解決するために(1)加工機の運動誤差の補正、(2)加工機の振動抑制、(3)加工運動の被削材への転写量の測定が必要なことを述べている。</p> <p>第2章では、高精密切削加工の高速化における問題点について考察し、工具刃先の運動誤差を抑制することと、工具刃先運動および加工後の被削材形状を機上で測定することの重要性について言及し、これを実現するための計測融合加工システムのコンセプトと開発したシステムの概要を述べている。開発したシステムでは、アーティファクトと高精度レーザ変位計による刃先運動の推定方法を考案している。また、加工後の被削材形状の機上測定には刃先運動測定と同じ高精度レーザ変位計を用いることで、計測の高速化および刃先運動の転写量測定の誤差低減を図っている。</p> <p>第3章では、誤差モデルを用いた加工機の運動誤差の補正法について述べている。運動誤差に大きな影響を与えるのは送り軸を構成する機械要素の形状の不正確さ、つまり幾何誤差であり、静的な誤差に分類される。静的な誤差を運動測定結果からモデル化する際に動的な誤差の影響を受ける。そこで静的な誤差の波長成分は運動速度に依存しない性質を利用して、運動測定データをフーリエ解析で波長成分に分解して、静的な誤差成分のみを分離して誤差モデルを同定する方法を提案している。開発したシステムのXY平面の運動におけるZ方向の誤差モデル同定にこの方法を用い、構築したモデルを用いて刃先運動の補正を行い、加工を想定した平面運動において、Z軸-XYテーブル間のZ方向の相対変位をPV値で<math>1.3\mu\text{m}</math>から<math>0.5\mu\text{m}</math>に低減できることを示している。また、非回転工具を用いた平面加工を実施し、補正の効果により加工面の形状精度を<math>1.0\mu\text{m}</math>から<math>0.4\mu\text{m}</math>に向上できることを示している。</p> <p>第4章では、マルチボディシミュレーションを用いて、加工機の力学特性を解析しながら設計を行い、加工精度に影響を与える振動を低減する方法について述べている。マルチボディシミュレーションを用いて、加工機の構成部品の近似レベルを剛体から弾性体へと変化させ、モード解析を行って固有振動数と固有モードを分析することで、構成要素の構造振動への寄与度を評価する。この方法を計測融合加工システムの設計に応用し、加工機のコラムとY軸ベースの剛性の構造振動への影響度が大きいことを示している。また、解析で300Hzまでに現れる振動モードに関して実験モード解析で固有振動数およびモード形状が対応するこ</p>			

とを確認し、このコラムの剛性感度解析と設計変更を行い、構造振動を抑制できることを示した。

第5章では、刃先運動の被削材形状への転写の度合いである転写率を求める方法を提案している。従来、切取り厚さがマイクロメートルレベルになると刃先運動が形状に完全に転写されないことはわかっていたが、その度合いについては不明であった。そこで、工具刃先運動と加工後の被削材形状の測定データに信号処理の手法を用いて転写率を推定する方法を検討している。まず、加工におけるすくい角、逃げ角、切り込みを変化させる工具刃先運動として正弦波運動を選び、この運動を用いてシェーパ加工し、このときの刃先運動と加工後の被削材形状を測定してその全振幅比を転写率と定義した。転写率を推定する方法として、刃先運動と加工形状のパワースペクトルを比較する波長成分ごとの同定法と、刃先運動と加工形状を直接比較する直接同定法を提案し、それぞれの同定方法の特徴について説明している。同時に、転写率測定の不確かさとして直接同定法においては標準転写誤差を定義し、波長成分ごとの同定法ではコヒーレンス関数を用いている。測定システムの検証のために、刃先運動がほぼ完全に転写される（すなわち転写率が1である）と考えられる単結晶ダイヤモンド工具を用いた無電解ニッケルの加工を対象として転写率の測定実験を行っている。同時に、加工形状の測定に机上測定とオフラインの形状測定機を用いて両者を比較し、机上測定を用いた転写率測定の影響要因について調べている。その結果、振幅  $0.5 \sim 4 \mu\text{m}$ 、波長  $11.5\text{mm}$  の正弦波形状の加工において転写率の測定結果は、ほぼ1となることを示した。また、オフライン形状測定と机上測定の比較から、机上測定では測定面の傾斜による形状測定誤差が発生する問題があることを示し、高速な校正用の測定運動を用いて形状測定用センサの平均感度を同定して測定データを補正する方法を考案し、その効果を検証している。

第6章では、単結晶・多結晶ダイヤモンド工具を用いて無電解ニッケルとアルミニウム合金を切削した場合の転写率の測定結果について報告している。そして、波長を連続的に変化させた工具刃先運動を用いて転写率の測定を行い、波長  $2\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$  の範囲では波長が転写率に与える影響がほとんどないことを示した。単結晶ダイヤモンド工具を用いてアルミニウム合金を加工した場合の転写率および標準転写誤差は無電解ニッケルを加工した場合とほぼ同様であることがわかった。多結晶ダイヤモンド工具を用いて無電解ニッケルを加工する場合は、波長成分ごとの同定法を用いた結果から、転写率が1.2程度となる場合があることを示している。また、直接同定法から転写率が1以上になる現象が、正弦波の谷部分の過切削および山部分の切残しに起因し、この原因が構成刃先の付着とその脱落片の工作物への付着が原因であると考察している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

氏名	河野大輔
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高精密な切削加工を高速に行うために、加工精度を支配する工具刃先運動の高精度化手法および刃先運動の加工面への転写の定量化手法について研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 高精密切削加工の高速化における問題点について考察し、この問題を解決するために工具刃先の運動測定機能と加工後の被削材形状の機上計測機能を持つ計測融合加工システムのコンセプトを示し、システム開発を行った。
2. 加工機の幾何運動誤差の低減法に関して、運動誤差の測定値から静的な誤差を分離してモデル化する方法について提案し、実験によってモデルによる補正の効果を検証した。
3. 加工機の構造振動のため高域での刃先運動精度が低下するという問題に対して、マルチボディシミュレーションを用いた解析法による剛性設計が振動抑制に効果的であることを示した。
4. 工具刃先運動測定と加工後の形状測定を用いて、刃先運動の被削材形状への転写の度合いである転写率を推定する方法を考案した。この方法を、転写率が1であると考えられている単結晶ダイヤモンド工具を用いた無電解ニッケルの加工で検証した。
5. 単結晶・多結晶ダイヤモンド工具を用いて種々の材料を切削した場合の転写率の測定を行い、この結果から多結晶ダイヤモンド工具を用いて無電解ニッケルを切削した場合に、過切削と切り残しが発生することを示した。

以上、本論文は、切削加工を用いてマイクロ～サブマイクロの形状精度を得るための方法を刃先運動の高精度化と刃先運動の加工形状への転写に分けて体系的に示したものであり、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11月20日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。