

博士（工 学） 山 田 誠

学位論文題名

5軸NC工作機械による主軸傾斜加工に関する研究

学位論文内容の要旨

今日の機械加工においては、加工コスト削減のため、高能率な加工法が要求されている。特に工業製品の高機能化・意匠性の向上に伴ない、製品の生産技術は金型を用いた量産技術に移行し、金型加工の高精度・高能率化が大きな課題となっている。現状の金型加工はボールエンドミルを用いた3軸制御NCフライス加工により製作されている。これは、ボールエンドミルの点接触加工により複雑な形状を加工可能なためである。この3軸制御金型加工において、大きく二つの問題が存在する。第一の問題として、段取り替えなしに工具ホルダの干渉を回避するためには、長い工具突き出し長を必要とすることがあげられる。例えば、一般的な金型によく見られる急勾配深溝部の加工において、被加工物（ワーク）と工具ホルダとの干渉を回避するためには工具突き出し長を長くしなければならない。このことにより、工具剛性が低下し、加工精度を低下させ、さらには高速送り加工が困難となり加工能率を低下させる問題となる。第二の問題点として、3軸制御ボールエンドミル加工では切削速度が低い工具の回転中心付近での加工、工具の弾性変形が大きくなる側刃部での加工を避けることができないことがあげられる。このことにより加工状態が不安定になり加工面性状が悪化することになる。これは、工具姿勢が固定していることにより生じる問題である。

これらの問題点は、工具姿勢を制御し、工具軸を加工面に対して傾斜させることにより解決可能である。5軸工作機械においては、工具軸を加工物に対して傾斜させるために回転2軸を利用することにより、工具軸を加工面に対して傾斜させる加工を実現することが可能である。すなわち、工具軸の姿勢を離散的に制御を行うことにより、工具剛性を確保することができ、かつ、中心近傍や側刃近傍を避けた有効な工具切刃を使用して加工することが可能となる。

これまで行われてきた5軸制御加工における工具経路を導出する研究は、主として要求加工形状の加工点毎に工具姿勢を決定する、同時5軸制御加工を適用するものであった。しかしながら、同時5軸制御加工では、一般に加工動作が複雑になりNCプログラム作成や検証が難しくプログラム作成に長時間を要することや、加工現場でのオペレータの加工認識性が悪いこと、また、運動軸数が多くなることにより剛性を保つことが困難であることなどの問題点が存在する。そこで、前述の金型加工における3軸制御加工の問題点を解決するためには、同時5軸制御でなくとも回転2軸で離散的に姿勢を割り出して3軸制御加工（主軸傾斜加工と呼ぶ）が有効である。本研究では同時5軸制御加工の工具姿勢の自由度を引き継ぎながら、従来の3軸制御加工のノウハウを継承することができる5軸工作機械による主軸傾斜加工を対象とする。

従来の主導主軸傾斜加工においては、加工時間や切削性に与える影響を総合的に判断

して工具突き出し長と割り出し角を決定する必要があり、熟練技能者が、加工する金型の形状、工具剛性等から経験により使用する工具突き出し長や割り出し角を決定している。主軸傾斜加工を広く利用するために、これらを決定するプロセスの自動化が望まれている。そこで本研究は、金型のボールエンドミルによる仕上げ加工を対象として、工具のワークに対する適切な工具姿勢を加工状態モデルの構築およびその検証実験から導出し、主軸傾斜加工における工具ホルダの干渉回避を考慮した、最適な割り出し角を自動的に導出する方法を構築することを目的とする。本論文の構成を以下に示す。

第1章では、本研究の背景・目的、概要および特徴について示した。

第2章では、5軸制御加工の必要性と課題、5軸工作機械における加工方法の分類について示し、その中で、主軸傾斜加工の現状と課題について示した。そして、主軸傾斜加工の概要、位置づけ、そしてその加工の特徴について示した。

第3章では、工作機械の数学的表現方法について示し、それから導かれる5軸工作機械の形状創成関数に基づいて5軸工作機械の機能的モデルを構築した。主軸傾斜加工においては、工具がどのような姿勢で切削に関与するか、特に、回転中心切刃点が切削にどのように関与するかを認識することは、加工状態を特定する上で重要な問題である。そこで、数学表記方法に基づいて、主軸傾斜加工におけるボールエンドミル加工をモデル化し、ボールエンドミルがどのような姿勢で加工しているかを特定するため、ボールエンドミルの加工状態モデルを構築した。

第4章では、構築されたボールエンドミルの加工状態モデルに基づき、5軸工作機械上での切削力測定実験を行いその結果から、送り方向に対する工具姿勢の変化によって特定される加工状態における加工安定性を評価し、加工状態モデルの検証及び安定的な加工状態となる工具姿勢を導出した。

第5章では、5軸工作機械を用いた主軸傾斜加工において、要求加工形状がソリッドモデルとして与えられることを前提とした最適割り出し角を導出する方法を提案した。これは、ソリッドモデルから与えられた要求加工部位を入力として必要な分解能で生成されたfacetの法線ベクトルを基に、割り出し角候補を導出するプロセスと、全ての割り出し角候補に対して、状態フラグ付き逆オフセット法を用いて工具干渉回避を考慮した割り出し角を導出するプロセスとからなっている。

第6章では、第5章で提案した方法に基づいて、この工程の繰り返しを具体例に適用し、最適割り出し角と加工可能領域とを導出する方法を提案し、実機での加工を通して、金型加工において5軸制御工作機械を用いた主軸傾斜加工が有効であることならびに、その加工のための提案する最適割り出し角導出方法が有効であることを確認した。

第7章では、研究総括・結論を示した。

最後に、金型のボールエンドミルによる仕上げ加工を対象として、構築されたモデルと実験により工具のワークに対する適切な工具姿勢を明らかにし、最適な割り出し角を自動的に導出する方法論を構築し、その検証実験から有効性を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査 教授 岸 浪 建 史
副査 教授 小野里 雅 彦
副査 教授 金 子 俊 一
副査 教授 北 裕 幸
副査 助教授 田 中 文 基

学位論文題名

5軸NC工作機械による主軸傾斜加工に関する研究

近年、製造業のグローバル化に伴い、工業製品の高精度・高機能・高付加価値化のための設計・生産・加工技術の要求が高まっている。そのような背景において、高付加価値加工を可能とする5軸NC工作機械を用いた加工法とその支援システムに関する研究が盛んに行われている。しかし、その多くは複雑な形状を加工するための加工システム開発を目的としており、高品質で高能率な製品加工を可能とする5軸NC工作機械を用いる加工法については、基礎理論の確立と支援システムの開発が望まれている未開拓の分野で、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現況にある5軸NC工作機械を用いた加工法とその支援システムにおいて、回転2軸で離散的に工具と素材の相対姿勢を制御して、並進3軸制御で工具移動制御を行う主軸傾斜加工を用いて、高品位で高能率な加工を可能とする加工法に関して、基礎的、実践的に研究を行い、機械加工システム上の有益な主軸傾斜加工法とその支援システムの開発方法論の確立を目的として研究、実証したものである。本論文の研究成果を以下に示す。

まず、近年の機械加工における、複雑な形状の加工、高能率加工、高品質加工の要求に対する5軸NC工作機械を用いた加工の利点と課題を示している。すなわち、これまで行われてきた5軸制御加工は、複雑な形状の加工を対象として同時5軸制御加工を行うものであり、その支援システムに関する研究は、主として要求加工形状の加工点毎に工具姿勢を決定するといった複雑な形状における工具経路を導出する研究であって、同時5軸制御加工では、一般に加工動作が複雑になりNCプログラム作成や検証が難しくプログラム作成に長時間を要することや、これまで培ってきた作業設計者や加工現場でのオペレータの3軸加工におけるノウハウが適用できること、また、運動軸数が多くなることにより剛性を保つことが困難であることなどの問題点が存在し、高品質な加工が困難であることを指摘している。これに対し、5軸NC工作機械を用い、回転2軸で離散的に素材姿勢を割り出して3軸制御加工を行う主軸傾斜加工の場合、高品質加工を実現できる可能性があることを示している。さらに、主軸傾斜加工による高品質加工を実現する際の課題、すなわち、高品位かつ安定に切削可能な工具姿勢範囲を明確にすることと任意の製品形状に対する工具姿勢決定法を確立する必要があることについて明らかにしている。

すなわち、高品位かつ安定に切削可能な工具姿勢範囲を明確にするために、工具モデルとその機能を明らかにし、安定な切削を可能とする工具姿勢領域を理論的に推定している。主軸傾斜加工においては、工具がどのような姿勢で切削に関与するか、特に、回転中心切刃点が切削にどのように関与するかを認識することは、加工状態を特定する上で重要な問題である。そこで、数学表記方法に基づいて、主軸傾斜加工におけるボールエンドミル加工をモデル化し、ボールエンドミルの加工状態モデルを提案している。また、工作機械の数学的表現方法について示し、それから導かれる5軸工作機械の形状創成関数に基づいて、ポストプロセッサに利用可能な5軸工作機械の機能的モデルを提案している。

次に、5軸工作機械上での切削力測定実験を行いその結果から、ボールエンドミルにおいて安定な切削状態を可能とする傾斜加工における切れ刃領域及び工具姿勢、送り方向の加工条件の存在を実験的に明らかにするとともに、提案したボールエンドミルの加工状態モデルを実証し安定的な加工条件の範囲を明らかにしている。さらに、同時5軸制御加工において、工具姿勢の方向が変化するとき、加工面に段差を生じることを理論的、実験的に示している。

さらに、5軸工作機械を用いた主軸傾斜御加工において、与えられた加工領域に対して、最適な工具姿勢自動決定法を明らかにしている。すなわち、要求加工領域を入力として必要な分解能で生成されたfacetの法線ベクトルを基に、割り出し角候補を導出するプロセスと、全ての割り出し角候補に対して、状態フラグ付き逆オフセット法を用いて工具干渉回避を考慮した割り出し角を導出するなど、独創的な手法を提案している。

最後に、与えられた加工形状に対する、領域の分割と工具姿勢の最適な決定方法について提案し、実機での加工を通して、金型加工において5軸制御工作機械を用いた主軸傾斜加工が有効であること、ならびに、その加工のための提案する最適割り出し角導出方法が有効であることを実証している。

これを要するに、著者は、5軸NC工作機械を用いた主軸傾斜加工法について基礎理論及びシステム構築論の新知見を得たものであり、生産システムに対して高品質加工の自動化に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。