

学 位 論 文 題 名

A Study on Geometric Analysis and Modeling for Virtual NC Machining

(仮想 NC 切削のための幾何学的解析とモデリングに関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、NC切削加工の普及が著しい。それに伴いCAD/CAM技術も大きく進歩し、以前は問題だった削り過ぎや削り残しのないNCデータの作成が、ほとんどの場合可能になった。しかし、たとえば発電機など大型機械の部品など、大型工具による同時5軸制御による加工が必要な場合、完全なNCデータの作成は現状のCAD/CAM技術によっても困難である。そのため、多大な費用と時間を要する、実機を用いた事前検証が不可欠となっている。

これに対し、ソリッドモデリング技術を応用した仮想NC切削が、80年代より提案されている。仮想切削は、素材のモデルと工具の移動軌跡立体(工具掃引体)の空間的差演算でも議される。しかし、幾何表現と処理の困難さから、実機による事前検証に完全に代替できるレベルには達していない。具体的な問題として、まず仮想NC切削の基本である工具掃引体について、その幾何特性に関する知識が十分体系化されていないことがあげられる。また、計算機実装上は、処理の安定性、高速性と十分な数値精度を共存させることが難しいという問題がある。これは部品サイズと切削深さの比が大きく扱う数値のレンジが広いこと、また互いに接触した立体同士の演算を行うなど数値処理が厳しい条件下で行われることと、きわめて複雑な形状を扱う必要があることに起因する問題である。

本論文は、仮想NC切削技術向上を目的として、これらの問題に対して行った研究の結果を述べたもので、7章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景・仮想切削の原理・課題について述べ、さらに従来方法と関連研究も紹介している。

第2章では、掃引体の性質を明らかにするための理論展開を行っている。掃引体に関連した理論としては包絡面の理論が知られているが、これは微分可能な曲面の移動にのみ適用可能なもので、一般ソリッド立体の掃引体の説明には不十分である。本章では掃引体の生成のメカニズムに立ち返って理論構築を行い、掃引体境界生成に関する必要十分条件を、一般ソリッド立体を無限階微分可能なプリミティブの集合演算で表現し、導出している。この必要条件は、包絡面理論が示す条件の他にソリッド境界点軌跡線とソリッド境界面の曲率が考慮されなければならないことを示しており、ソリッド立体の凹部は掃引体境界を構成しないことなどを理論的に説明できる。必要条件の導出はすべて理論的手順より、さらに計算機実験によっても結果の

妥当性を示している。

第3章では仮想NC切削に適したソリッドモデリングについて、最初の提案を行っている。まず、課題の整理を行い、形状表現精度、演算処理の安定性、高速性、および複雑な形状の表現能力を考慮すべきであることを示し、また従来のソリッドモデリング法にそれぞれ限界があることを述べている。次に8分木による空間分割とCSGソリッド表現の組み合わせによるソリッドモデルGraftreeを提案し、CSGと同等の表現能力を備えつつ、形状表現精度、演算処理の安定性、高速性の問題が克服されることを示している。すなわち、Graftreeの基本処理は、立方分割空間のCSGプリミティブ（半空間）に対する内外判定のみであり、この処理が安定であることによりGraftree処理全体の安定性が確保される。さらに、集合演算や光線追跡による表示等が空間分割の効果によって高速に行われることが示されている。

第4章では、第3章で残された問題に対応するため、ソリッドモデリング法について第2の提案を行っている。すなわち、工具掃引体のようなきわめて複雑な形状を取り扱うため、3値論理によるソリッドモデリング方法を提案している。3値論理ソリッドモデリングは対象形状について、その内部に確実に含まれている領域(IN)、境界を含んでいる領域(HULL)、および外部の領域(OUT)を3値論理の集合演算によって組み合わせる方法である。対象形状が複雑でもIN、HULL領域は単純なものとして定義できるので、複雑な幾何処理が排除できる。また境界情報が必要なときには近似形状を用いた境界抽出処理を行うが、近似形状の精度を目的に応じて制御することができる。3値論理ソリッドモデリングの実現方法として、Graftreeの拡張による方法が示されている。Graftreeによる方法の特徴としては、拡張されたGraftreeは従来のGraftreeの定義と基本処理アルゴリズムを包含すること、したがって2値論理による単純な形状と3値論理による複雑な形状の双方を同時に表現することができること、また空間分割の効果により境界抽出処理においては局所的な近似形状を用いることができること、が述べられている。

第5章では、拡張されたGraftreeを実際の仮想NC切削に適用するための具体的な手順を明らかにしている。具体的には、まず工具動作のパターンのうち3値論理を適用する範囲を定め、次に工具掃引体のモデリングについて通常のモデリングを行う例とHULL領域の定義方法を示している。さらに、3値論理演算時に境界抽出により加工面情報を得る方法として、Graftreeの分割空間ごとに工具掃引体の近似表現を用いる方法を示し、その際に近似表現の精度を制御する方法について述べている。

第6章では仮想NC切削システムの構築方法が示されている。仮想NC切削システムでは、削りすぎや工作機械構造部品と非削材の干渉など、NCデータの問題点を効率的かつ高精度に検出する必要がある。本章では基本的な方法論として、最終加工結果と削りすぎなどの発生する加工ステップのみを注意深くチェックする「選択的加工検証」という概念を提示している。また、選択的検証に基づくシステムが、除去空間記憶による切削結果情報の保持と、切削の準備・実施・検査の各作業を模擬するシステム構成と、寸法測定・干渉検出・加工ステップ研削の各処理手段とによって実現できることを示している。

第7章は本研究の結論であって、得られた結果を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇

副 査 教 授 五十嵐 悟

副 査 教 授 岸 浪 建 史

学 位 論 文 題 名

A Study on Geometric Analysis and Modeling for Virtual NC Machining

(仮想 NC 切削のための幾何学的解析とモデリングに関する研究)

近年、NC 切削加工の普及が著しい。それに伴い CAD/CAM 技術も大きく進歩し、以前は問題だった削り過ぎや削り残しのない NC データの作成が、ほとんどの場合可能になった。しかし、大型工具による同時 5 軸制御による加工が必要な場合、完全な NC データの作成は現状の技術によっても困難である。そのため、多大な費用と時間を要する、実機を用いた事前検証が不可欠となっている。

これに対し、ソリッドモデリング技術を応用した仮想 NC 切削が、80 年代より提案されている。仮想切削は、素材モデルと工具の移動軌跡立体（工具掃引体）の空間的差演算でも議される。しかし、幾何表現と処理の困難さから、実機による事前検証に完全に代替できるレベルには達していない。具体的な問題として、まず工具掃引体の幾何特性に関する知識が十分体系化されていないことがあげられる。また計算機処理の安定性、高速性と十分な数値精度を共存させることが難しいという問題がある。これは部品サイズと切削深さの比が大きく、扱う数値のレンジが広いこと、数値処理が厳しい条件下で行われることと、きわめて複雑な形状を扱う必要があることに起因する問題である。

本論文は、仮想 NC 切削技術向上を目的として、これらの問題に対して行った研究の結果を述べたもので、7 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景・仮想切削の原理・課題について述べ、さらに従来方法と関連研究も紹介している。

第 2 章では、掃引体の性質を明らかにするための理論展開を行っている。まず包絡面理論の限界を示した後に、一般ソリッド立体を無限階微分可能なプリミティブの集合演算で表現し、掃引体境界生成に関する必要条件を導出している。これは、包絡面理論が示す条件の他に、ソリッドの境界点軌跡線と境界面の曲率が考慮されなければならないことを示しており、ソリッド立体の凹部は掃引体境界を構成しないことなどを理論的に説明できる。必要条件はすべて理論の手順より導出され、さらに計算機実験によって結果の妥当性を示している。

第 3 章では仮想 NC 切削に適したソリッドモデリングについて、最初の提案を行っている。まず課題の整理を行い、形状表現精度、演算処理の安定性、高速性、および複雑な形状の表現能力を考慮すべきであることを示し、また従来法にそれぞれ限界があることを述べている。次に 8 分木による空間分割と CSG ソリッド表現の組み合わせによるソリッドモデル Graftree を提案し、

CSG と同等の表現能力を備えつつ、形状表現精度、演算処理の安定性、高速性の問題が克服されることを示している。さらに、集合演算や光線追跡による表示等が空間分割の効果によって高速に行われることが示されている。

第4章では、工具掃引体のような複雑形状を取り扱うため、3値論理によるソリッドモデリング法を提案している。これは対象形状について、その内部に確実に含まれている領域(IN)、境界を含む領域(HULL)、および外部領域(OUT)を3値論理の集合演算によって組み合わせる方法であり、複雑な幾何処理を排除することができる。さらに、近似形状の精度を目的に応じて制御するため、Graftreeの拡張による方法が示されている。その特徴として、従来の定義と基本処理アルゴリズムを包含すること、したがって2値論理による単純な形状と、3値論理による複雑な形状を同時に表現することができること、また空間分割の効果により境界抽出処理においては局所的な近似形状を用いることができること、が述べられている。

第5章では、拡張 Graftree を実際の仮想 NC 切削に適用するための手順を明らかにしている。具体的には、工具動作のパターンのうち3値論理を適用する範囲を定めた後に、工具掃引体のモデリングについて通常のモデリングを行う例と、HULL 領域の定義方法を示している。さらに、Graftree の分割空間ごとに工具掃引体の近似表現を用いて加工面情報を得る方法を示し、その際に近似表現の精度を制御する方法について述べている。

第6章では仮想 NC 切削システムの構築方法論が示されている。ここではまず、NC データの問題点を効率的かつ高精度に検出するために、最終加工結果と削りすぎなどの発生する加工ステップのみを注意深くチェックする「選択的加工検証」という概念を提示している。また、選択的検証に基づくシステムは、除去空間記憶による切削結果情報の保持と、切削の準備・実施・検査の各作業を模擬するシステム構成と、寸法測定・干渉検出・加工ステップ検索の各処理手段とによって実現できることを示している。

第7章は本研究の結論であって、得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、NC 切削加工において特有な諸問題に対して、ソリッドモデリングをベースとしたアプローチにより、有効な仮想 NC 切削システムが構築可能であることを示したものであり、仮想 NC 加工自動化への有益な新知見を得ており、精密工学、生産システム工学の進歩に寄与するところ大である。

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。