

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：12605
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760113
 研究課題名（和文）工作機械の物理モデルを援用した
 複合加工機用工程設計支援システムの開発
 研究課題名（英文）Development of CAPP System for Multi-tasking Machining by using
 the physical model of machine tools
 研究代表者
 中本 圭一（NAKAMOTO KEIICHI）
 東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：90379339

研究成果の概要（和文）：加工方法に対応する幾何学的な特徴領域（加工フィーチャ）を目標形状から認識して、NCプログラムを生成する複合加工機用工程設計支援システムを開発した。3次元CADソフトウェア上でモデリングした工作機械を用い、加工時間、加工精度、加工コストの指標を計算して多くの判断時に活用し、工作機械の物理的特性も考慮することで、より総合的な指標に基づいた工程設計が可能となり、加工時間の短縮や加工精度の向上が期待できる。

研究成果の概要（英文）：NC programming for multi-tasking machine tools requires much time and labor. The study aims the rationalization of the automatic process planning by extracting the machining feature in consideration with turning and milling. As a result, it is expected to reduce the preparatory time on CAM system, using output data from the proposed system. Applying the system to several product shapes containing both turning feature and milling feature, it is confirmed that NC data can be obtained for each shape without any problem.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：複合加工機，工程設計，工作機械，CAM，精密部品加工

1. 研究開始当初の背景

工作機械は、高速化、多機能化、多軸化が進み、機械加工の多様なニーズに対応できるように進化を遂げている。そして近年では、工作機械の究極の姿とも言える複合加工機が開発され、その普及過程にある。複合加工機は、NC旋盤とマシニングセンタの機能を併せ持ち、旋削加工とフライス加工の両者を可能にする。従って、段取り替えの省略によるリードタイム短縮や加工精度の向上、複数の工作機械を1台で置き換えることによる占有面積の削減が可能である。

複合加工機は、上記のように多機能であるものの、加工中にはその機能の一部は常に用

いられず、大量生産向けの生産設備としては過剰スペックとなり不向きである。例えば、旋削加工時にはフライス加工用の工具主軸が活用されていないことが多い。一方で、今後拡大が予想される多品種少量生産では、極めて優れた生産設備と考えられる。しかし、このときの生産リードタイムは、加工時間に対してその準備に費やされる非加工時間が相対的に大きな割合を占める。このため、工作機械、加工方法、加工条件など数多くの組合せに対して、その加工プロセスを予測して高能率な工程設計案を素早く提示できる支援システムの開発が必要となる。

経験や試行錯誤に頼っていた工程設計を

自動化し、非加工時間を短縮することは従来から試みられてきた。特に、目標形状の幾何学的情報から加工方法を特徴付ける加工フィーチャを認識し、それと加工方法・手順を対応させる研究が多い。研究代表者らも複合加工機に向けた工程設計支援及びNCプログラム生成を行うシステムを開発してきたが、基本的には同様の手法を用いていた。しかし、複合加工機は多機能であるが故に加工方法の選択肢が増加し、極端な場合には、旋削加工とフライス加工のどちらを選択するか、といった問題に直面する。これを解決するためには、計算機内で構築した工作機械の物理モデルを援用し、工程設計支援システムにおいて加工時間や加工精度などを比較して総合的に判断できることが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、目標形状の幾何学的情報に加え、工作機械の物理的特性も考慮することができる、複合加工機用工程設計支援システムの実現を目指す。現在までに取り組んできた研究では、目標形状から加工方法に対応する特徴領域（加工フィーチャ）を認識し、NCプログラムを生成することができる。これは従来からの一般的な幾何学的手法を適用したものであるが、複合加工機の工程設計支援を対象とした世界で初めての試みであった。しかしながら、複数の加工方法・手順が考えられ得る領域については主観的判断で一意に決定しており、複合加工機の特徴である旋削加工とフライス加工の使い分けについても妥当性の検証は十分でなかった。

一方、近年では計算機内で構築した物理モデルを用いて、機構、伝熱、流体などのマルチドメインシミュレーションを行い、設計初期の構想設計を支援する解析ツールが飛躍的に進歩している。そしてこの中には、3次元CADソフトウェアからデータを読み込み、それを容易に解析で利用できるものもある。従って、3次元CADソフトウェア上でこれまでに開発してきた工程設計支援システムと構築した工作機械の物理モデルを援用して、工作機械の物理的特性も考慮した工程設計を実現することは可能と考えられる。

そこでまず、最新の複合加工機（森精機製作所 NT4250/1000SZ）をケーススタディの対象とし、物理モデルの構築を試みる。3次元CADソフトウェア上で主要部品形状をモデリングし、解析ツールと関係させて機構シミュレーションを実現する。これにより、従来開発してきた工程設計支援システムでの静的な干渉チェックを動的な干渉チェックへと拡張することができ、より正確な加工時間の予測も可能になる。また、加工中に発生した切削力などに起因する工作機械・工具の変形や振動を再現して加工精度を予測し、複

数考えられる加工方法・手順を選択するための指標とした工程設計を実現する。さらに、加工に伴う工具摩耗の進展や主軸・駆動軸の消費電力を考慮して、加工時間、加工精度に加えて加工コストや環境負荷も加工方法・手順を選択する際の評価指標とすることを試みる。

3. 研究の方法

目標形状の幾何学的情報に注目した手法で、複合加工機用工程設計支援システムの開発を始めている。ここでは、加工方法に対する幾何学的な特徴領域（加工フィーチャ）を目標形状から認識し、NCプログラムを生成して実際に加工するまでの一連のプロセスを達成している。これと連携させて、工作機械の物理的特性を工程設計へ反映させるため、まず3次元CADソフトウェア上で工作機械の主要部品をモデリングし、物理モデル構築の基礎とする。これは保有している複合加工機を対象にし、寸法や質量については取扱説明書やメーカーへの聞き取り調査で、できる限り忠実に作成する。

次に、モデリングした工作機械を用いて解析ツールにより工作機械の機構シミュレーションを実現し、動的干渉チェックを実現して加工時間を正確に予測できるようにする。市販NC装置における制御アルゴリズムを知ることが不可能であるため、高速度カメラや変位計を使って加減速時の工具位置等から推測する。市販の切削シミュレータにも、加減速時間を考慮していることを標榜しているものはあるが、加工時間の予測精度は低く、一般には移動距離を送り速度で割るだけの簡略化されたものが多い。これに対して本研究では、市販製品以上の予測精度を実現することを目指す。

さらに、一般的な鉄・アルミ系材料の溝やポケット加工などを対象に発生する切削力などによる工作機械・工具の変形の再現を試みる。切削力の算出には、切削断面積を基に計算するいわゆる切削係数法を適用し、切削係数は基礎実験を行って実測した値を用いる。切削力や熱による工作機械構造の変形は、CADソフトウェアに付属する有限要素解析機能でも計算は可能であるが、計算時間は非常に長くなる。そこで、別途開発している工作機械構造の静・動・熱剛性を高速に算出するシステムも利用する。

引き続き、発生する切削力などによる工作機械・工具の振動の再現を試みる。切削力と機械構造（工具変位）の伝達関数は、FFTアナライザで効率的に取得する。また、工具摩耗の進展や主軸・駆動軸の消費電力を考慮した加工コストや環境負荷の見積りを行う。主軸の消費電力については、想定した切削トルクによる増加分、駆動軸については機構シミ

ュレーションから計算される各モータトルク・電流値と比較し、妥当性を検証する。そして、ここでまで得られた加工時間、加工精度、加工コストの指標を、従来から開発してきた複合加工機用工程設計支援システムで発生する多くの判断時に活用する。目標形状の幾何学的情報を利用して、加工方法を特徴づける領域（加工フィーチャ）を認識すると、加工方法・手順に複数の候補が得られることが一般的であり、さらに複合加工機ではそれらの選択肢が必然的に増加する。これに対して、工作機械の物理的特性も考慮することで、より総合的な指標に基づいた工程設計が可能となり、加工時間の短縮や加工精度の向上が期待できる。

4. 研究成果

開発した複合加工機用工程設計支援システムの処理の流れを図1に示す。本システムはCAD上で定義された素材形状と目標加工形状を入力情報とし、入力された目標加工形状から加工フィーチャの認識を行う。本システムでは図2に示す16種類の加工フィーチャを取り扱っており、各加工フィーチャには対応する加工方法や使用工具が割り当てられ、幾何形状を参照して決定される。

次に、認識した加工フィーチャ間の関係性を整理し、フィーチャツリーと呼ばれる階層ツリー状にまとめる。作成されたフィーチャツリーから加工順序として考えられる候補を挙げ、素材形状と目標加工形状の差から得られる除去形状を、各加工段階で除去する領域へと分割を行う。最後に各加工段階において使用工具、加工方法、加工条件をそれぞれ選択し、除去領域の体積から加工時間を予測する。予測された加工時間を比較し、最も短時間で加工が行える組み合わせを選択し、CAMシステムへ入力する情報として出力する。

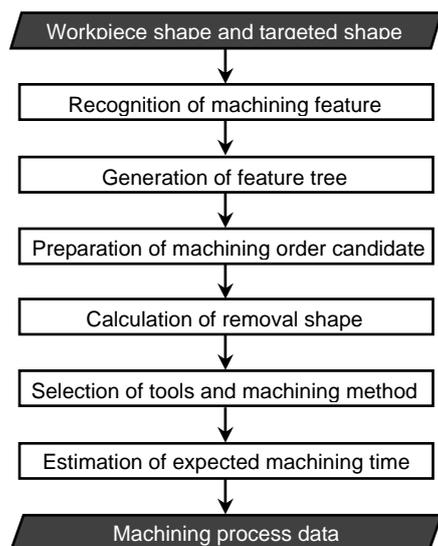


図1 工程設計支援システムのフロー

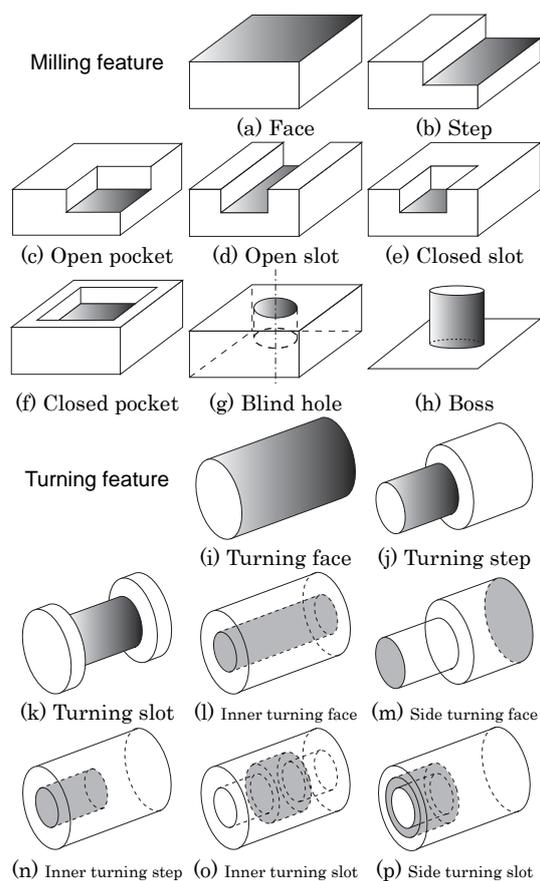


図2 取り扱う加工フィーチャ

加工フィーチャ間には目標加工形状における位置関係から、加工時の形成順序に優劣をつけることができる。開発したシステムではこの基準面をFace, Side turning faceに含まれる平面としている。また、ターニングを考慮して、Turning faceに含まれる円筒面も基準面としており、この場合、基準は円筒面のもつ中心軸からの距離とする。また、加工フィーチャ間での順序は位置関係以外にもその種類によって制限される。これを加工フィーチャの依存性と呼ぶ。

位置による関係性と加工フィーチャの依存性をもとにフィーチャツリーが構築される。フィーチャツリーは階層ツリー構造となっており、上位の要素ほど加工順序の優先度が高いことを表している。また、フィーチャツリーのトップはFace, Turning face, Side turning faceのいずれかであり、これは実際の加工において、始めに基準となる面を加工した後、その他の要素が作成されることを考慮して設定している。図3にターニングとミリングの両加工が必要となる製品形状の例と、構築されたフィーチャツリーを示す。

複合加工機は2つの旋盤主軸を持つものもあり、第1旋盤主軸側と第2旋盤主軸側で分けて加工することもできる。そのため、目標加工形状の両端とも素材形状と一致しない場合は、把持替えを行い加工する。CAD上で

複合加工機のモデルを定義し、入力された目標加工形状を第1旋盤主軸側に配置する。その上で、作成されたフィーチャツリーのトップにある加工フィーチャに対して加工時に機械の干渉が起こりうるかを確認する。

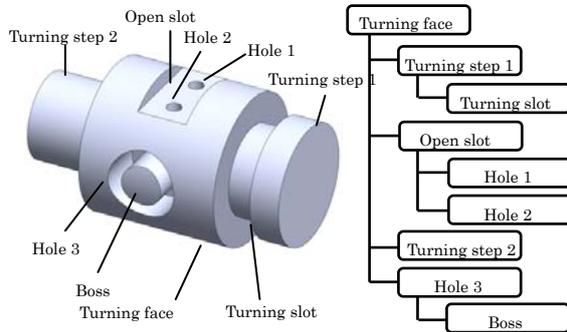


図3 フィーチャツリーの例

加工順序の候補それぞれにおいて、除去領域の体積から加工時間を推定する。加工時間の予測方法には、主に除去領域の体積を切削率（単位時間当たりの切削体積）で割り求める方法と算出した工具経路の長さを送り速度で割り求める方法がある。後者の方がより実際に所要する加工時間に近い数値が得られるが、その反面、前者と比べるとより多くの計算時間を必要とする。提案する処理方法では比較する加工順序の数が多いため、前者の方法で加工時間を予測する。

3次元CAD上で定義した目標加工形状、素材形状を本システムに適用し、動作を確認した。図4にそのときの入力情報を示す。また、加工フィーチャの認識結果を図5に、決定された加工順序に基づいて算出された除去領域に対してCAMシステムで工具経路を作成した例を図6に示す。

以上のように、本研究では、複合加工機を用いた加工データの準備作業を円滑に行うために、工程設計を支援するCAPPシステムの開発を行い、以下の成果を得た。

(1)従来の複合加工機用CAMシステムでは、NCデータの作成時に多くの手作業が求められ、時間と労力を必要としていたが、本研究では、CADで定義された製品形状からターニングとミリングの加工フィーチャを認識し、加工方法、使用工具、加工条件、加工順序を決定することにより、CAMシステムの入力に必要な加工情報を自動的に作成し、その労力・時間を低減することができた。

(2)実際にCAD上で定義された製品形状に対し、提案したシステムを適用し、出力された加工情報から市販のCAMシステムでNCデータが問題なく作成できた。また、実際に加工実験を行った結果、正常な加工結果が得られたことから、開発したシステムの動作が確認された。

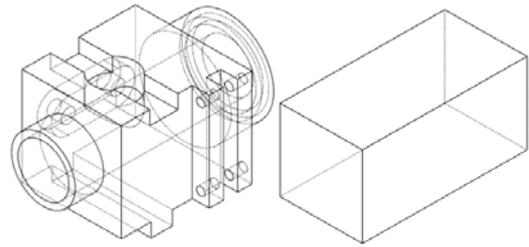


図4 目標加工形状と素材形状

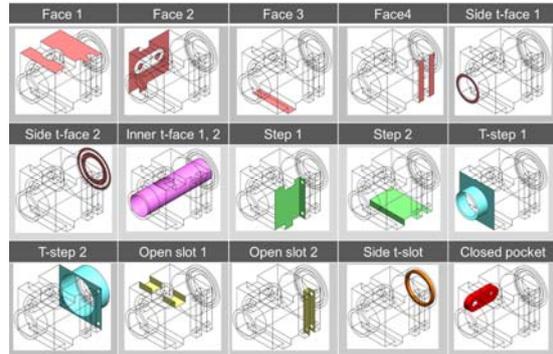


図5 認識された加工フィーチャ

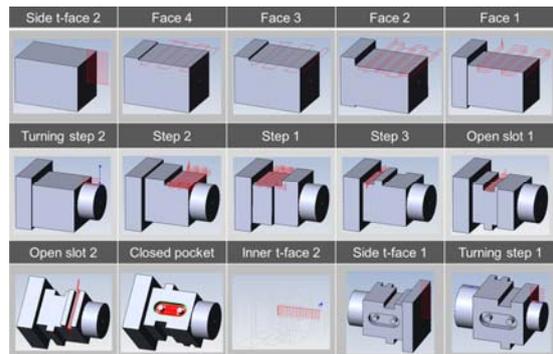


図6 CAMで生成された工具経路

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- (1) 小山泰明, 中本圭一, 竹内芳美; 超精密マイクロ加工のためのCAMシステムに関する研究—高アスペクト比形状の5軸加工に対応した工程設計—, 精密工学会誌, 78巻, 10号, pp.912-917, (2012). 査読有
- (2) 濱田大地, 中本圭一, 石田 徹, 竹内芳美; 複合加工機用CAPPシステムの開発, 日本機械学会論文集(C編), 78巻, 791号, pp.2698-2709, (2012). 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中本 圭一 (NAKAMOTO KEIICHI)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90379339