

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820032

研究課題名(和文)仕上げエンドミル加工における過大切削抵抗抑制のための追加工工程自動計画手法の開発

研究課題名(英文) Automatic optimization method of cutting conditions for reduction of cutting force in finish machining process

研究代表者

金子 順一 (KANEKO, Jun'ichi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80375584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、NC切削加工における新しい工程自動計画法の開発を目的とする。具体的には事前切削抵抗予測技術の開発と、削り残し領域を対象とした追加工時の工程自動計画アルゴリズムの開発を行った。期間中には、軸加減速を考慮した工具送り速度、比切削抵抗パラメータの推定手法を開発し、過大な切削抵抗が作用する除去予定領域を事前予測によって推定し、工具姿勢変更によって抵抗の作用を回避するシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new efficient planning method of cutting condition and cutter location for continuous multi axis controlled machining. First, NC simulation algorithm for workpiece volume in machining process and an accurate simulation method for instantaneous cutting force are proposed. Then, automatic optimization system for cutter location and tool posture has been developed with the proposed simulation models.

In the optimization system, the tool posture on cutter location is gradually renewed by a new candidates of tool posture. These process are applied for each cutter location in continuous tool path in NC program. To shorten calculation time, the ultra-parallel processing technology is introduced. In the developed prototype system. The developed system can optimize NC program which is generated by commercial CAM system for aerospace parts, and maximum torque loaded on cutting tool on each cutter location can be reduced.

研究分野：生産工学

キーワード：同時多軸制御加工 CAM 並列処理 切削抵抗予測 シミュレーション 工具姿勢計画 工具経路計画 数値制御加工

1. 研究開始当初の背景

近年の同時多軸制御切削加工においては、高効率な切削条件の適用により、素材形状から製品形状を直接切削加工によって創成する工程が広く用いられつつある。この種の工程の設計に際しては、工具摩耗や破損の抑制や、工具送り条件の最適化の際に、工具経路の各所における工具への作用切削力を考慮することが非常に重要とされる。特にインペラ等の航空機部品においては、素材形状からの直接切削の過程において、大径工具を用いた荒取り加工の削り残しを図1に示すようにブルノーズエンドミルやボールエンドミルといった比較的小径の工具で除去する中仕上げ加工が頻繁に行われている。この種の加工では、大径工具の通過によって生じたカスプ形状を工具が通過する際に工具によって除去される加工対象物の体積が急激に変動する傾向があるため、安全な加工のためには加工条件の設定が重要であると考えられる。切削抵抗の予測と加工条件の設定に関するこれまでの研究では、工具に作用する3分力を、工具の回転角ごとに求める瞬時切削抵抗モデルを使用し、工具経路の各位置における作用切削力やトルクを推定してこれをもとに工具送り速度を変更する手法が提案されている。また、3軸制御工作機械における等高線加工を対象とした手法では、切削抵抗に対応して半径方向の切込み量を変更する手法が提案されているが、工具姿勢と工具経路についてはこれまで検討が行われてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では、工具の相対姿勢による除去形状の変化が生じないボールエンドミルを対象に、計算機予測を元に作用トルクの小さい工具姿勢および工具経路を自動的に設定する手法の開発を目的とする。同時多軸加工における各機械軸間の加減速の正確なモデルを導入し、これとともに加工途中形状と工具との干渉をVoxel形状表現、工具による加工途中形状への除去領域を工具掃引形状による認識を用いて行う切削シミュレーションシステムを開発する。そして、これらの形状表現を参照して複数の姿勢候補における干渉領域(EA:Engagement Area)を高速に導出し、作用トルクが最小となる姿勢を反復的に選択することで加工条件の最適化を実現する。

3. 研究の方法

研究では、まず切削抵抗予測モデルにおける実験パラメータである比切削抵抗値を高速に導出するための支援システムの開発を行い、次に各軸の加減速モデルを用いた運動経路情報の評価システムの開発を実施する。そしてこれらの結果を用いて多軸制御加工における最大切削トルクを干渉の生じない工具姿勢ごとに比較し、切削トルクが最少と

なる工具先端点の軌跡、および工具姿勢を自動的に導出するシステムの開発を行った。

4. 研究成果

以下では各研究要素の成果概要について述べる。

・比切削抵抗パラメータの高速導出

エンドミル加工の比切削抵抗モデルによる切削抵抗予測では、各切れ刃における切込み深さに対する主分力、配分力の各成分を合計4つの定数で導出する必要がある。本研究では、重切削条件下での実験データからこれらのパラメータの値を自動的に推定する計算機システムの開発を行った。一般に工具切れ刃は図2に示すようにねじれ角を有しており、重切削条件では工具の回転角を切削動力から推定することが難しい。そこで開発手法では、図3に示すように、回転角と係数の推定を交互に行い、予測結果が一致するパラメータを漸進的に探索する新しいアルゴリズムを実装し、高速なパラメータ値推定を実現した。

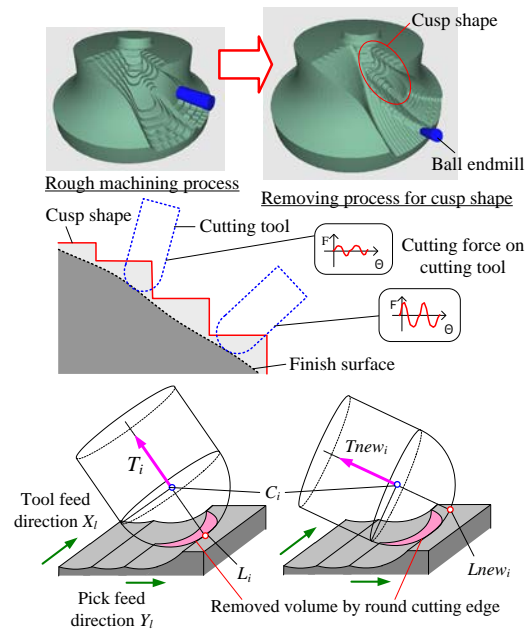


図1 カスプ形状除去に伴う切削抵抗変化とボールエンドミル切削加工における除去領域への影響のない工具姿勢変化

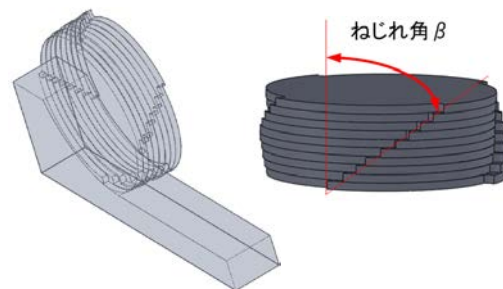


図2 エンドミル工具におけるねじれ角の切れ刃各部における切込み深さへの影響

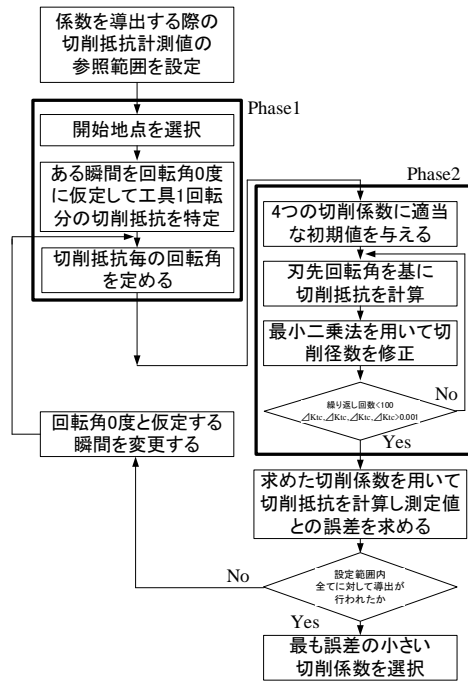


図3 工具回転角および切削係数の同時自動推定アルゴリズム

・切削抵抗予測のための工具運動推定

NC コントローラに与えられる NC プログラムでは、工具が一定の速度で運動するとされているが実加工では、図4のように工具は運動の開始時より加速し、停止以前に減速を開始する。そのため、工具運動方向の変化時には各軸の加減速によって工具の運動経路には運動誤差が生じる。そこで工具の加減速による運動誤差を含む工具経路を推定する予測モデルを開発した。

予測モデルでは、加減速の各種に対して実験での実験によってパラメータを導出し、これをもとに加減速予測式を当てはめて事前予測を行う実験的モデルの検討と実装を行った。図5、図6の指数関数型加減速、直線型加減速について、XY 軸の同期運動時の工具の経路を精度よく予測することが可能となっている。

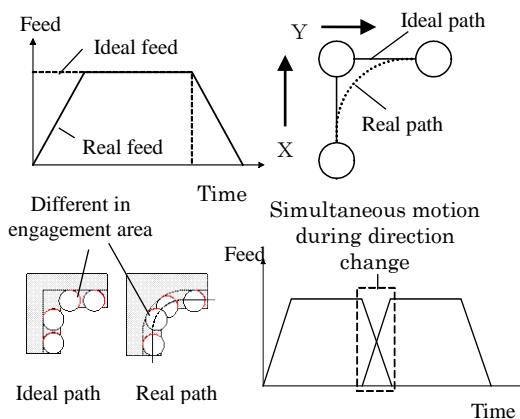


図4 工具加減速時に生じる運動遅れおよび工具運動経路誤差

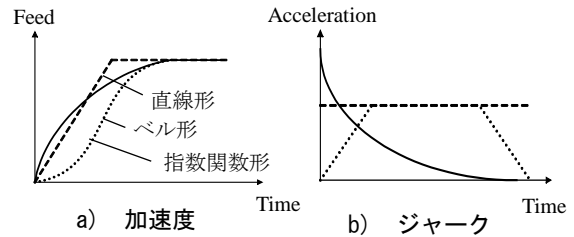


図5 工具加減速の種類

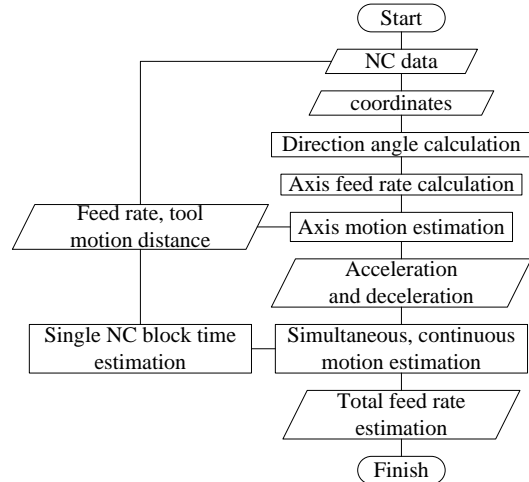


図6 工具加減速運動の実験的予測モデル構成

・工具姿勢・工具経路自動最適化

本研究における工具切れ刃軌跡と除去領域の関係を図7に示す。提案手法では、工具の切れ刃に対して微小長さごとに数百点の代表点を設定し、それらが回転角 $\theta$ を与えられた場合の軌跡位置において、各点が加工対象物の内側に存在しているかどうかを2次元離散領域上の色情報として表す。また、工具姿勢の変化によって、完成後の加工対象物形状に対する削りこみが発生しないかどうかを検出するため、ボールエンドミルの円弧切れ刃部分以外の切れ刃とシャンク部分にも同様の代表点を設定し、これと加工対象物との干渉状態を同様に検出している。

開発手法では、CAM システムによって決定された工具先端点経路・工具姿勢に対して、ボールエンドミルの切れ刃中心に工具姿勢を微小角度変化させて設定した新しい工具姿勢候補を8つ設定し、これらの切削抵抗を予測している。図8に工具姿勢候補の設定について示す。工作機械のB軸およびC軸への指令値に対して、微小角度(db,dc)だけ正負に変化させた姿勢候補を8つ設定し、これらの新姿勢における切削三分力と、工具の直線刃部分、およびシャンク部分と加工対象物完成形状との干渉状態を導出している。

複数の工具姿勢候補の中から、工具への最大トルク値が小さく、加工対象物完成形状との干渉のない姿勢候補を新しい工具姿勢とし

て該当の工具位置に与え、これを全ての工具切れ刃位置ごとに繰り返して新しい NC プログラムを導出する。全ての工具先端位置における切削抵抗が低減しなくなるまでこの過程を複数回繰り返し、工具姿勢の最適化を終了する。

提案した手法の有効性検証では、GPU を用いた汎用並列処理ライブラリである CUDA 環境下で切削抵抗予測および作用トルク比較を行い、工具経路各位置における工具姿勢を変更するシステムを開発し、計算機実験を行った。図 9、図 10 は加工対象物形状と、初期姿勢候補における最大作用トルクの変動、および最適化後の最大作用トルク変動の例を表す。図 11 は変更前後での工具一回転分の切削三分力の変化と姿勢の変化を比較したものであり、工具姿勢の変化に伴って切削三分力の波形が変化し、作用トルクの発生に関係する  $F_y$  方向の作用力が減少し、工具に作用するトルクの一回転中の最大値を低減することが可能であることが確認された。

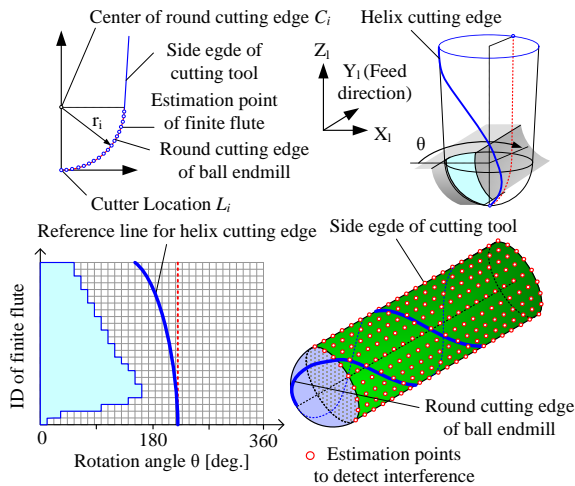


図 7 工具切れ刃通過軌跡の 2 次元平面上での離散的表現および工具軸の干渉検出

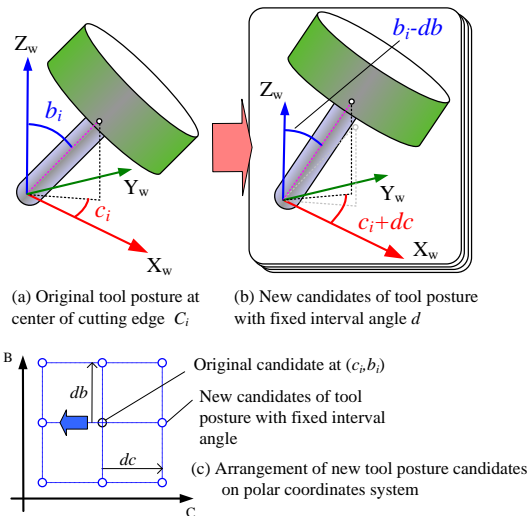


図 8 新しい工具姿勢候補の機械座標系上での設定手法

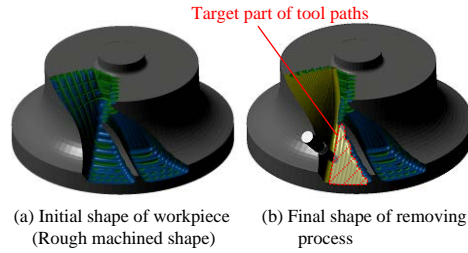


図 9 インペラ加工におけるカスプ除去中仕上げ工程

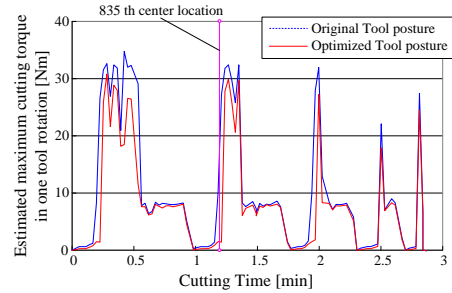


図 10 提案システムによる作用最大トルク作用値の低減結果

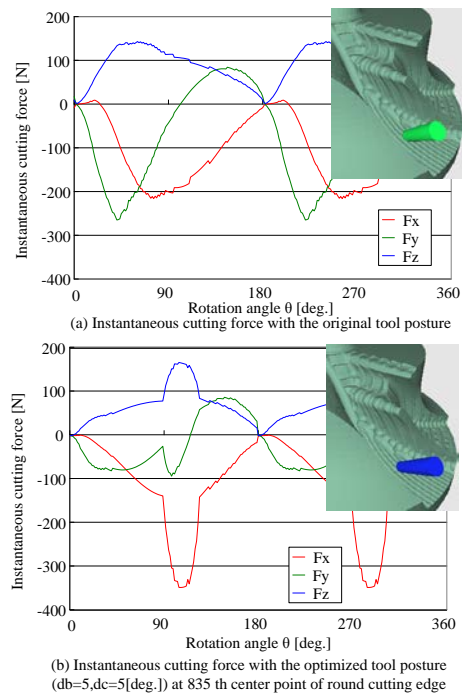


図 11 中仕上げ工程中の工具位置(835 番目)における瞬時切削抵抗の最適化前後における変化

## 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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 金子順一、堀尾健一郎、切削抵抗予測を基にした同時多軸制御切削加工における工具姿勢の決定方法、日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2014 講演資料集、2014 年 3 月 17 日、電気通信大

- 学（東京都・調布市）
- ② 赤木知洋、金子順一、堀尾健一郎、切削抵抗予測における比切削抵抗の高速自動推定システムの開発、2014年精密工学会秋季大会、2014年9月17日、鳥取大学（鳥取県・鳥取市）
  - ③ Ahmad Lutfi bin Othman, Jun'ichi KANEKO, Kenichiro HORIO, Development of tool motion simulation method for cutting force prediction in high speed machining, MJIT-JUC Joint International Symposium 2014、2014年11月13日、クアラルンプール(マレーシア)
  - ④ Juni'chi KANEKO, Process Planning of NC Machining based on Parallel Processing with GPGPU, International Symposium on Ultra precision Engineering and Nanotechnology、2015年3月17日、東洋大学白山キャンパス（東京都・文京区）

〔その他〕

ホームページ等

<http://kousaku.mech.saitama-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金子 順一(KANEKO, Jun'ichi)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80375584