

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420042

研究課題名(和文) 切削による迅速試作を志向した機械加工インタフェースの開発

研究課題名(英文) Development of Machining Interference that Aims for Rapid Prototyping by Cutting

研究代表者

森重 功一 (Morishige, Koichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：90303015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、作業者が工作機械やCAMソフトウェア等のツールの複雑な操作を意識することなく、目的の機械加工を容易に実現できるように、作業者、工作機械、ソフトウェアの間を取り持つインタフェース機能を開発することを目的としている。従来のCAMソフトウェアでは対応することが困難であった複雑なミーリングや旋削を対象にして、入力用のインタフェースとして力覚呈示装置を採用することにより、作業者の直感的な入力に基づいて適切なNCプログラムを短時間で生成することが可能となった。得られた成果については、国内の学会や国際会議で積極的に公表した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop interface functions between operator, machine tool and CAM software that allows us to achieve target machining easily without their considerations for complicated operation of machine tool and CAM software. Complicated milling and turning were targeted, which had great difficulty in making NC program in case of using conventional CAM software. The rapid generation of suitable NC program became passible by applying a haptic device as input interface. As the results, the usefulness of developed system was confirmed through some machining experiments.

研究分野：生産システム工学

キーワード：機械加工 工作機械 生産工学 力覚呈示装置 インタフェース ミーリング 旋削 CAD/CAM

### 1. 研究開始当初の背景

近年、国内の製造業においては、大量生産による仕事が中国や韓国、東南アジア諸国などに流出する中、試作に関する仕事の比率が高まりつつある。迅速な試作の一手法として積層造形法が実用化され、現在では「3Dプリンタ」として普及しつつある。しかしながら、現行の3Dプリンタは、樹脂や金属などの材料の制約や、積層方法の問題などから、製品と同じ精度や強度の製品を造形することはできない。量産される製品の、機械的な性能を評価するためには、量産品と同じ材料を使い、量産品と同じ精度や強度を持つ試作品が、迅速に提供されることが望ましい。そのためには、量産品と同じ材料を高精度に加工することができる切削による迅速試作技術の確立が不可欠であると考えられる。

複雑な形状を効率よく加工するための手段として、制御軸数を増加させることにより、オーバハング部などを有する複雑な形状の加工を可能にした5軸制御工作機械が普及しつつある。5軸制御加工の場合、機械の複雑な動きを実現するために、CAMソフトウェアを利用して作成したNCプログラムを事前に用意することになるが、作業者が意図する加工動作を反映したNCデータを作成するためには、多くの知識と時間を必要とする。最近では、加工そのものに掛かるコストよりも、NCプログラムの作成に掛かるコストの方が問題となりつつある。

### 2. 研究の目的

本研究は、作業者の意思に基づいた直感的な機械加工を実現するためのインタフェース機能を開発することにより、切削による迅速試作方法の確立を目指すものである。

これまでの研究により、入力用のインタフェースとしてペン型の力覚呈示装置 (Haptic Device、以後 HD と略す) を採用して、5軸制御工作機械や旋盤による機械加工を支援する機能を開発してきた。本研究では、これまでに開発したインタフェースを適用した独自のCAMソフトウェアを提案し、実用化に向けた具体的な方向性を示す。

### 3. 研究の方法

人間と機械の間を取り持つインタフェース機能に関する研究は、バーチャルリアリティの分野を中心に進められており、装置の開発やその応用などに関する取り組みが活発に行われている。その中で研究対象の一つとなっているHDは、仮想空間を操作するための道具であり、衝撃や反動、振動、慣性などの物理的な力覚を作業者に伝達し、計算機のディスプレイに表示された仮想オブジェクトに触り、重さや硬さを感じることを可能にする装置である。作業者がデバイスを通じて3次元位置を入力すると、デバイスを通じて適切な反力が返される。

図1に、本研究で開発した5軸制御による

ミーリング加工用インタフェースによる工具経路生成作業の様子を示す。まず、計算機内の仮想空間に、加工対象となる3次元モデルを設定する。作業者は、PCのディスプレイ上に表示される仮想工具をスタイラスにより操作し、工具の位置・姿勢を入力する。同時に、スタイラスを介してHDから出力される力覚を感知する。仮想工具とモデルの位置関係をNCプログラムに変換し、5軸制御工作機械に転送して加工を行う。

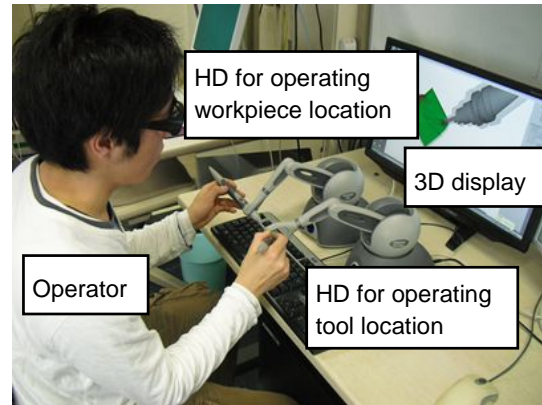


図1 2つの力覚呈示装置を用いた5軸制御ミーリング用インタフェース

### 4. 研究成果

#### (1)5軸制御加工システム

当初から研究の対象としていた5軸制御加工については、入力インタフェースとしてHDを採用した独自のCAMソフトウェアを開発して機能の拡充に努めた結果、インペラなどの複雑な加工対象物に対しても、直感的かつ最小限の入力で適切な加工データを生成することが可能となった。従来のCAMソフトウェアを利用した場合と比較して、大幅に作業時間を短縮することができるため、作業設計の省力化に大きく寄与できると考えている。

#### システムの概要

本システムでは、図2に示すように、仮想工具、目標形状、母材形状から目標形状を引いて得られる除去形状の3つのオブジェクトを仮想空間に配置している。仮想工具と目標形状の干渉を監視し、干渉が検知された場合には力覚を生成し、作業者に干渉しない工具位置を呈示する。

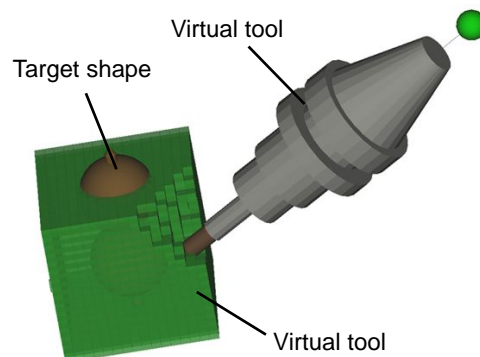


図2 仮想空間における3種類のモデル

除去形状は、切削状況を動的に描画させるために、一様要素分割法を用いた Voxel によって表現されている。工具の有効切れ刃に接触した除去形状の Voxel を消去し、仮想空間内での加工を表現している。

オブジェクト同士が干渉している場合、干渉を回避する最短の位置・姿勢にオブジェクトを移動させる力覚を出力して回避する。力覚の生成には、仮想的なバネ・ダンパモデルを利用している。

工具への負荷を考慮した切込み量の制限

荒加工の工具経路を作成する時に過剰な切込みのある経路を生成しないようにするために、HD の力覚を用いて切込み量を制限する機能を実装した。切込み深さが指定された許容量を超えた場合、力覚を用いて過切削を回避する。また、切込み量が許容量を超えない場合でも、切削除去量が大きくなると工具にかかる負荷も過大となる。そこで、単位移動当たりの除去量を制限することによって工具負荷を軽減する手法を提案する。

仕上げ加工経路の生成

本研究では、加工面に配置したボールエンドミルによる仕上げ加工用の工具中心点に対して、HD を用いて工具姿勢を直接与えることで、仕上げ加工の経路を生成する手法を開発した。干渉が発生した時は、HD を用いて修正する。

最初と最後のパスの始点と終点、計 4 点に対して姿勢を入力し、図 3 に示すような暫定的な工具経路が生成される。この経路に対して干渉チェックを行うと、干渉物近辺の姿勢で目標形状との干渉が検出される。

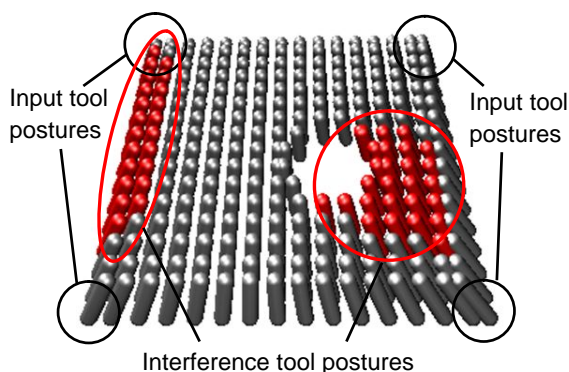


図 3 工具干渉が存在する暫定的な工具経路

ここで、図 4 に示すように、干渉が生じている工具中心点が表示されるので、作業者は干渉点付近で干渉を回避する工具姿勢を HD により入力する。最初に入力した 4 点と干渉が生じた切削点付近で新たに入力した 2 点の姿勢を補間することにより経路を修正する。

干渉が検出されなくなるまで以上のような修正を繰り返すことにより、図 5 に示すように工具干渉のない工具経路が生成される。干渉が発生した付近で工具姿勢が修正されていることがわかる。

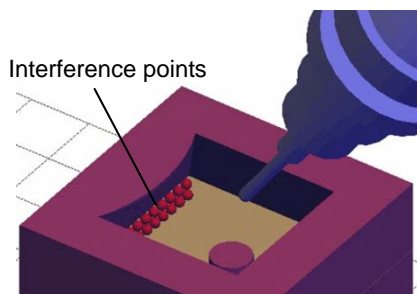


図 4 工具干渉が生じた切削点における工具姿勢の再入力

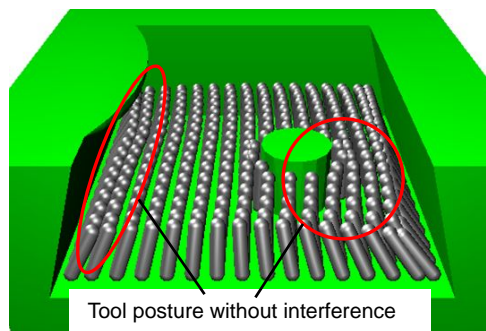


図 5 工具干渉が生じた切削点における工

今後の課題

さらに加工精度を向上させるためには、モデルの分解能を増加させることが不可欠であり、それに伴う計算負荷増大への対応も重要となる。利用している 3 次元モデルのデータ構造の最適化など、プログラム全体のアルゴリズムを見直すと同時に、GPGPU の技術を利用した並列処理の導入などについても検討しなければならない。

## (2) 旋削加工システム

旋削加工用のインタフェースについても、前年度までに開発された外形加工、内径加工、溝掘り、穴あけ等の基本的な加工を対象とした機能を拡張した結果、底部にオーバハング部を持つ溝形状など、現行の CAM ソフトウェアや CNC 旋盤に付属している対話式プログラミングシステムでは対応できないような複雑な旋削にも対応できるようになった。自作した工具による加工にも対応できるように、入力情報のフォーマット等の利用技術の開発についても検討した。

システムの概要

開発した旋削加工システムを図 6 に示す。PC 内の仮想空間に加工対象となる仮想工作物を設定し、ディスプレイ上に表示される仮想工具を HD で操作することにより、仮想工作物を旋削加工する。この作業時の仮想工具の位置を記録して工具経路を生成し、NC 旋盤に出力することで、仮想空間における旋削加工を実際に再現することができる。

本システムでは、ディスプレイ上に仮想工具と仮想工作物を描画することで旋削加工を表現している。仮想工具と仮想工作物の形状の入力データとして、3 次元 CAD で定義した STL データを採用した。STL データを読み込んだ後、2 次元のピクセルデータに変換し



て工作物を表現する。工具によって切削されたセルを非表示にすることにより、切削加工を表現することができる。

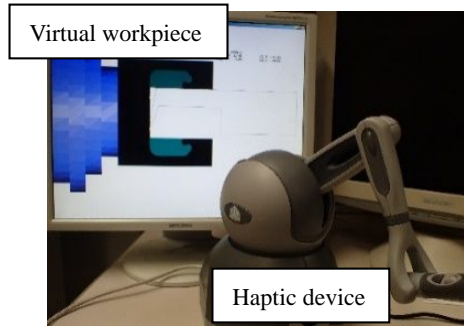


図 6 開発した旋削加工システムの外観

### 工具設定インタフェース

開発した CAM ソフトウェアでは、仮想工具の設定の省力化のために、図 7 に示すような工具の有効切れ刃と工具送り方向を設定するインタフェースを実装した。

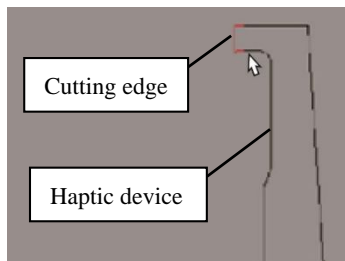


図 7 工具設定画面

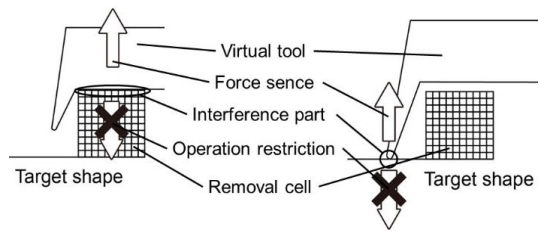
工具の STL データを入力すると、工具の輪郭点が画面上に表示される。作業者が工具輪郭点の始点と終点をマウスで指定することによって工具の有効切れ刃部が設定される。設定された有効切れ刃部以外の輪郭部は、工作物と接触できない工具シャンク部として設定される。さらに、キーボードからの入力によって、切削時に工具が移動可能な方向として上下左右の 4 方向を設定する。

設定終了後、工具の輪郭データに有効切れ刃の位置と工具送り方向の情報を付与した工具情報ファイルが出力される。再度同じ工具を使う際は、出力した工具情報ファイルを読み込むことにより、工具の設定作業を省略して即座に経路データの作成を行うことができる。

### 力覚の援用による操作制限

工具を操作する際に避けるべき動作として、工具と工作物の干渉や、工具が目標形状に切り込んでしまうオーバーカットがある。

そこで、工具シャンク部と未切削のセルの間に干渉が検出された時は、図 8(a)のように工具の進入方向と逆方向に力覚を出力することによって、シャンクと工作物の接触を防止する。同時に、有効切れ刃部に対しても、図 8(b)のように目標形状セルとの干渉に対して進入方向と逆方向に力覚を主力することによって、目標形状に対するオーバーカットを防止している。



(a)シャンク部の干渉 (b)オーバーカット

図 8 力覚による工具動作の制限

また、溝入れバイトや突っ切りバイト等の工具は、切削方向に対して垂直な方向に動かすことはできない。そこで図 9 に示すように、設定された工具送り方向以外の方向に未切削セルを検知した時は、逆方向の力覚を出力することによって工具の移動を制限する。

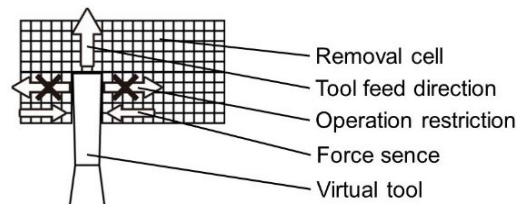


図 9 力覚による工具送り方向の制限

### ケーススタディ

図 10 に示す複雑形状を加工対象とし、形状に対応するために自作した図 11 に示す特殊剣バイトを用いた加工について説明する。

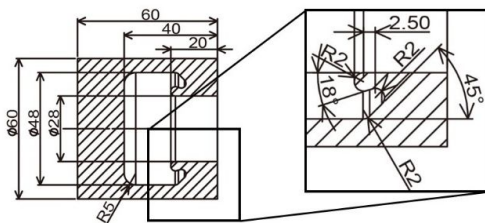


図 10 加工対象形状



図 11 自作した特殊剣バイト

工作物には、ポリ塩化ビニル製の円柱を使用した。加工条件は、送り速度 30mm/min、主軸回転速度 500rpm と設定した。加工した工作物の断面を図 12 に示す。

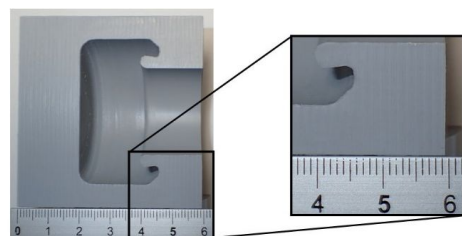


図 12 加工結果

作業中は、設定された有効切れ刃によって切り込み深さが制限されていることから、ほぼ一定の切り込み深さを維持しながら経路を入力することができた。最大で 0.3mm 程度の未切削部分が確認されたものの、オーバーカット等の問題は確認されなかった。

## 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)

神田倫之、森重功一、工具干渉と構造干渉を考慮した 5 軸制御加工用工具経路生成法、精密工学会誌、査読有、第 81 巻、第 10 号、969 - 973

DOI: 10.2493/jjspe.81.969

Raiyo OKA and Koichi Morishige、Development of Turning Machine Operation Interface that Uses Haptic Device、International Journal of Automation Technology、査読有、Vol.8、No.3、445-451  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020096460>

### [学会発表](計 15 件)

Tomoya Kakoi and Koichi Morishige、Development of CAM system for 5-axis controlled machining using Haptic Device - Tool path generation in consideration of removal amount per unit time -, The 16th International Conference on Precision Engineering、2016.11.15、アクトシティ浜松(静岡県浜松市)

困知哉、森重功一、Haptic Device を用いた 5 軸制御加工のための CAM システムの開発、日本機械学会第 11 回生産加工・工作機械部門講演会、2016.10.22、名古屋大学東山キャンパス(愛知県名古屋市)

森重功一、市谷拓也、Haptic Device を用いた旋削加工用 CAM システムの開発

特殊工具を用いた複雑形状加工、日本機械学会 2016 年度年次大会、2016.9.12、九州大学伊那キャンパス(福岡県博多市)

本多寿矢、森重功一、Haptic Device を用いたエンドミル加工の切削力体験システムの開発、2016 度精密工学会秋季大会学術講演会、2016.9.6、茨城大学水戸キャンパス(茨城県水戸市)

困知哉、森重功一、HD を用いた 5 軸制御加工のための CAM システムの開発 単位時間当たりの除去量を考慮した経路成、型技術者会議 2016、2016.6.23、大田区産業プラザ PiO(東京都大田区)

Koichi Morishige and Miharu Nakada、Development of turning machine operation interface that uses haptic device (Application to complicated cutting by special byte)、49th CIRP Conference on Manufacturing Systems、2016.5.26、Stuttgart Commundo Hotel (Stuttgart、Germany)

Masanori Ishii and Koichi Morishige、Tool path generation for five-axis controlled machining by using square and radius end mill with consideration of cutting load change、The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century、2015.10.19、京都市リサーチパーク(京都府京都市)

森重功一、中田美晴、Haptic Device を用いた旋盤加工用インタフェースの開発 特殊工具による複雑加工への対応、

日本機械学会 2015 年度年次大会、2015.9.16、北海道大学(北海道札幌市)

困知哉、森重功一、Haptic Device を用いた 5 軸制御加工のための工具姿勢呈示手法の開発、2015 度精密工学会秋季大会学術講演会、2015.9.4、東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市)

佐々木駿也、森重功一、多軸制御工作機械操作インタフェースによって生成した工具経路の近似補正、2015 度精密工学会春季大会学術講演会、2015.3.17、東洋大学白山キャンパス(東京都文京区)

桜井一範、森重功一、多軸制御工作機械操作インタフェースにおける工作物に対する工具干渉防止、2015 度精密工学会春季大会学術講演会、2015.3.17、東洋大学白山キャンパス(東京都文京区)

桜井一範、森重功一、Haptic Device を用いた 5 軸制御加工のための加工インタフェースの開発、型技術ワークショップ 2014 in 愛知、2014.11.27、ウインクあいち(愛知県名古屋)

佐々木駿也、森重功一、Haptic Device を用いた多軸制御工作機械操作インタフェースの開発(工具経路の直線および曲線による近似)、日本機械学会 第 10 回生産加工・工作機械部門講演会、2014.11.15、徳島大学常三島キャンパス(徳島県徳島市)

森重功一、梅津周平、Haptic Device を用いた 5 軸制御 CAM の姿勢呈示用インタフェースの開発、日本機械学会 2014 年度年次大会、2014.9.8、東京電機大学 東京千住キャンパス(東京都足立区)

森重功一、岡 頼陽、Haptic Device を用いた旋盤加工用インタフェースの開発、型技術者会議 2014、2014.6.17、大田区産業プラザ PiO(東京都大田区)

### [その他]

ホームページ等

<http://www.ims.mce.uec.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森重 功一 (MORISHIGE、Koichi)

電気通信大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：90303015