

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560117

研究課題名(和文)力覚による援用を利用した工作機械操作インタフェースの開発

研究課題名(英文)Development of Operation Interface of Machine Tool that Uses Haptic Force

研究代表者

森重 功一 (Morishige, Koichi)

電気通信大学・情報理工学(系)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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、工作機械の新しいマンマシン・インタフェースとして、バーチャルリアリティの分野で利用されている力覚提示装置の適用を提案している。これまでの研究では、ペン型の力覚提示装置を利用して5軸制御加工を支援する機能について開発を進めてきた。本研究では、これまでの研究で開発した力覚提示装置および計算機周辺の機能を充実させることにより、最終目標である力覚提示装置と工作機械が連動する自由度の高い工作機械操作インタフェースの実現を目指している。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a machining system that uses a haptic device as a new operation interface to enable even beginners to operate a machine tools easily and safely. The haptic device is important because it can provide the user with sensations of physical force, such as shocks or vibrations, in the virtual space. These sensations of force function to guide the operator to suitable operation by limiting tool movement. In this study, a system is developed to teach, using the haptic device, the tool movements in machining shapes in a virtual space. The tool movement that is taught is output as the movement of machine tool, and the actual machining is performed. In our study, the usefulness of developed system is confirmed through machining experiments.

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：工作機械 生産工学 力覚提示装置 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

現在の工作機械は、CNC (Computerized Numerical Control) 化によって、生産性や加工精度の向上が図られてきた。現在では、制御軸数をさらに増加させることにより、自由曲面やオーバハング部分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 データを事前に用意して用いることになる。作業者が意図する加工動作を反映した NC データを作成するには、多くの時間と知識を必要とする。

一方、試作品や金型などの一品ものを加工する場合、削り残し部分の除去などの些細な加工に対して CAM ソフトウェアで加工動作を検討するのでは効率が悪い。このような場合は、機械に付属したインタフェース機能を利用し、機械を直接操作することになるが、現在の CNC 工作機械は NC 加工を前提としたものであり、付属している操作インタフェースは各軸に対応したボタンやハンドルのみであり、操作性を意識したものとは言い難い。

以上のような背景から、これからの工作機械は、作業者が機械の複雑な特性を意識することなく、工作機械を手動で容易に操作できるように、作業者と工作機械の間を取り持つインタフェース機能について検討する段階にあると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は自由度の高い 5 軸制御工作機械の操作を容易にするために、力覚によって支援された新しいマンマシン・インタフェースの開発を目的としている。

具体的な目標としては、バーチャルリアリティの分野で開発され、普及が進みつつある力覚提示装置と工作機械が連動する自由度の高い工作機械を操作するためのインタフェースの実現を目指している。

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力覚提示装置 (Haptic Device、以後 HD と略す) 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。

想定しているシステム運用の様子を図 1 に示す。まず、PC 内の仮想空間上に加工対象となる 3 次元モデルを定義する。続いて、ディスプレイ上に表示されている仮想工具

を HD で操作し、仮想工具とモデルの位置関係を 5 軸制御工作機械の動きと同期させて加工を行う。

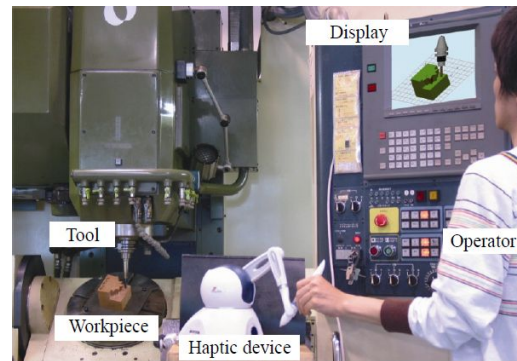


図 1 システム運用の予想図

4. 研究成果

申請時に予定していた工作機械メーカーとの共同研究が、リーマン・ショックや震災の影響によって中止となって以来、研究の遂行に不可欠であった CNC 装置や工作機械などが借用できなくなった結果、研究開始当初から研究方針の大きな転換を余儀なくされ、本研究で開発した力覚提示装置および計算機周辺の機能を、実際に工作機械に接続することが不可能となってしまった。

しかしながら、図らずも力覚提示装置と計算機の周りの機能の開発に注力することになった結果、力覚自由度を拡張した新たな力覚提示装置の導入したうえで、入力された経路を最適化する機能の開発、未切削部分に対する干渉回避の検討など、より本質的な課題を進展させることができた。さらに、追加の課題として開始した旋削加工用インタフェースについては、卓上 CNC 旋盤を用いて実際の加工に使用できることを示すことにより、関係者からも注目されるようになるなど、大きな手応えを感じている。

(1) 未切削部分に対する干渉の回避

本研究では、力覚 6 自由度の HD として、東京工業大学精密機械工学研究所佐藤研究室が開発した SPIDAR-GCC (以下、SPIDAR) を使用している。

本研究で開発したシステムを図 2 に示す。開発したシステムでは、リアルタイムに変化する除去形状を、微小立体要素 (Voxel) の集合体である Voxel モデルを用いて表現している。



図 2 開発したシステムの外観

まず、図3に示すように、仮想空間内における工具有効切れ刃以外の部分と除去形状の干渉情報から、仮想的なバネモデルによって並進力 F 、トルク T を定義し、干渉情報を基に6自由度の力覚を生成した。続いて、並進力とトルクをSPIDARから力覚として呈示することで除去形状と仮想工具の干渉を回避する。

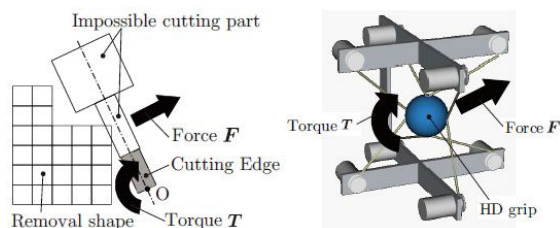


図3 Voxel モデルと仮想工具の干渉回避方法

仮想工具の形状と Voxel モデルについて干渉情報を取得して力覚を計算し、出力して干渉を回避した場合、仮想工具と除去形状が干渉してから力覚が出力されることになり、干渉回避を実現することができない。そこで、図4に示すように、仮想工具を外側にオフセットした形状を干渉判定領域と定義し、除去形状との干渉判定を行い、並進力とトルクを算出した。この処理により、仮想工具と除去形状が干渉する前に干渉を回避するための力覚を出力することが可能となった。

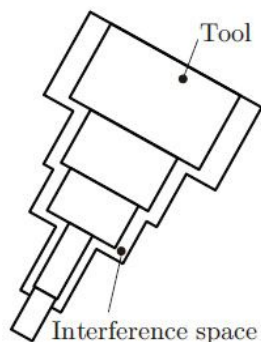


図4 干渉判定領域の設定

(2) 経路の最適化

HD は人間の手で操作するため、想定していない手ぶれ等の動作が工具の動きに反映されてしまう。そこで本研究では、デジタルフィルタを用いた工具経路のリアルタイムスムージング機能を実装した。

デジタルフィルタとは、離散的な信号に数学的な処理を行うためのフィルタである。手ぶれは高周波成分であるため、高周波成分を遮断するローパスフィルタや、指定周波成分を遮断するバンドストップフィルタを用いて除去している。しかし、このようなフィルタは、波形の位相特性を変化させ、位相遅れを生じさせてしまうため、リアルタイムでの処理には適していない。

そこで本研究では、特定周波帯域をフーリ

エ級数で近似する Band-limited Fourier Linear Combiner (以下、BMFLC) と呼ばれるアルゴリズムを使用しているバンドストップフィルタを採用した。このフィルタの特徴は、最急降下法に基づく Least Mean Square (LMS) アルゴリズムを用いて、フーリエ級数の係数を最適化できることにある。この最適化処理により、位相遅れの少ない信号を生成することが可能となる。

本研究で設計した、BMFLC フィルタと2種類のローパスフィルタを組み合わせたフィルタを図5に示す。

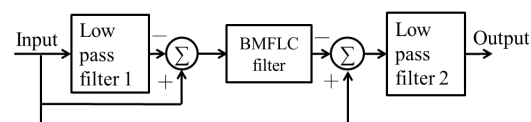


図5 設計したフィルタのブロック線図

1つ目のローパスフィルタは、入力信号とフィルタ後信号の差分を求めることで、手ぶれ以上の高周波成分 (2Hz ~) を抽出する。この処理は、LMS アルゴリズムによる手ぶれ信号の最適化を行う際に、主成分のある程度取り除いた参照信号を用意するためのものである。その後、抽出した参照信号を用いた BMFLC フィルタで信号の手ぶれ成分 (2 ~ 4Hz) を近似し、原信号から取り除く。

手ぶれの周波数成分を取り除いた後も、BMFLC の近似誤差によって生じるノイズや、原信号に含まれていた微小なノイズが残っている。2つ目のローパスフィルタは、このような手ぶれよりも高い成分 (10Hz ~) のノイズを除去するためのものである。ローパスフィルタの位相遅れは、主成分に近い手ぶれ周波数成分を取り除くことから生じる。よって、手ぶれ成分よりも高周波の成分を取り除くこのローパスフィルタによる遮断では、位相遅れの影響は無視できるほど小さくなる。

本研究で設計したフィルタが、加工面性状に与える影響を検証するために、図6のようなモデルに対する加工のシミュレーションにより加工面の様子を確認した。

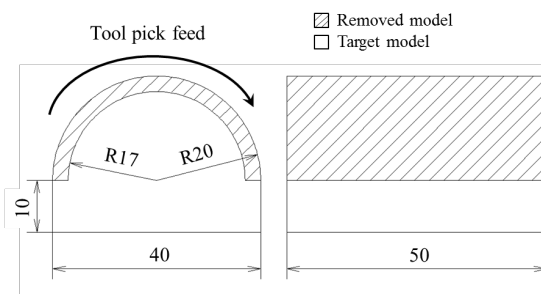
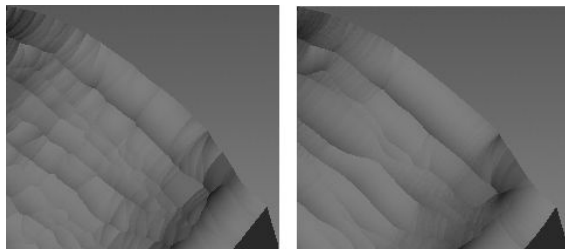


図6 加工面性状の検証実験に使用したモデル

図7に加工表面の一部を示す。フィルタの効果により経路の乱れが減少し、加工面性状が向上していることがわかる。



(a) スムージング前 (b) スムージング後
図7 加工面性状の比較

(3) 旋削加工用インタフェースへの展開

本研究では、旋盤のための新しい操作インタフェースとして HD を採用し、複雑な旋削加工を直感的に行うことができるシステムを開発した。

本研究で開発したシステムを図8に示す。PCのディスプレイに表示される仮想工具をHDで操作し、回転状態を想定した仮想工作物を旋削する。工具によって旋削された部分のセルを非表示にしていくことで、加工によって工作物の形状が変化する様子を表現している。この時の仮想工作物と仮想工具の位置関係を、旋盤の動きとして出力することにより、仮想空間における加工を再現する。

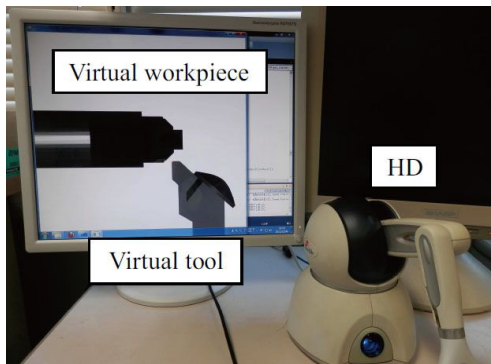
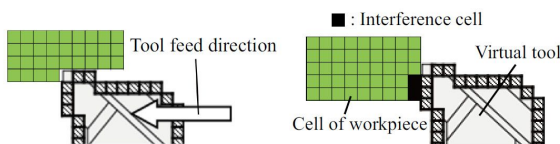


図8 開発した旋削システムの外観

本システムでは、過剰な切り込みが発生しないように、切り込み量を制限する機能を実装している。図9に示すように、工具の STL データをもとに工具の輪郭形状を抽出し、有効切れ刃以外の部分を工作物のセルとの干渉を検出する領域として設定する。仮想工作物のセルは、有効切れ刃が侵入したときのみ除去される。



(a)干渉なし (b)干渉あり

図9 切り込み量の判定による工具送りの制限

仮想工具を移動させる際には、移動後に仮想工作物のセルと干渉検知領域の干渉がないか調べる。干渉がない場合は、図9(a)のように仮想工具をHDの位置座標へ移動させた

後、有効切れ刃と干渉した仮想工作物のセルを除去する。干渉検知領域とセルが干渉する場合は、移動は行われず、図9(b)に示すように、仮想工具は仮想工作物の表面に留まる。

図10に示すように、STLデータをもとに目標形状の表面とセルの位置情報の比較を行い、目標形状の表面と干渉するセルを切削不可能なセルとして設定する。仮想工具の移動判定時に、切削不可能なセルと有効切れ刃を含む仮想工具の干渉を判定し、干渉がある場合は工具の移動を制限する。これによって、目標形状に対応するセルが仮想工具によって除去されるのを防ぐことができる。

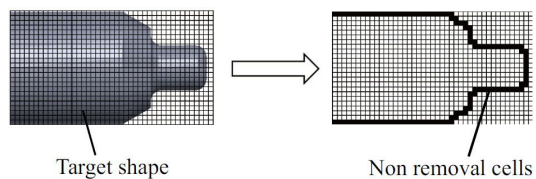


図10 干渉チェックのための目標形状の抽出

図11に示す寸法目標形状に対して、開発したシステムにより工具経路を生成し、加工実験を行った。工作物には、長さ60mm、直径30mmの円柱に、直径10mmのドリルで下穴を加工したものを使用した。加工結果を図12に示す。目標形状に沿った旋削加工が行われ、オーバーカットが防止されていることや、工具と内径部分の干渉が発生していないことなどを確認することができた。作業中は内径部分の形状が常に画面に表示されるため、内部の形状を把握しながら経路の生成を行うことができた。

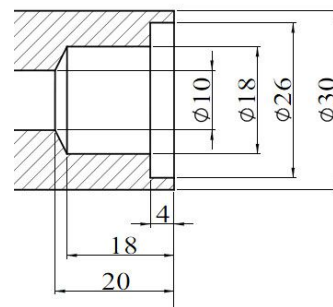


図11 加工実験の目標形状



図12 加工後の形状

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4件)

増田拓也、森重功一：C-Space を用いた 5 軸制御加工のための工具経路生成 — スクエアおよびラジアスエンドミルによる加工への対応—、精密工学会誌、第 78 巻、第 1 号、pp.57-61 (2012.1)、査読有
Syuhei Kobori and Koichi MORISHIGE : Development of Operation Interface for Machine Tool using 6-DOF Haptic Device - Guidance of Tool Movement using Force Sense -, Key Engineering Materials, Vol.516, pp.337-342 (2012)、査読有
Tomoyuki Kanda and Koichi Morishige : Tool Path Generation for Five-Axis Controlled Machining with Consideration of Structure Interference, International Journal of Automation Technology, Vol.6, No.6, pp.710-716 (2012.11)、査読有
岡本謙、森重功一：統計的パターン認識に基づいたボールエンドミルによる切削面の外観検査、日本機械学会論文集 C 編、第 79 巻、第 803 号、pp.2585-2596 (2013.7)、査読有

[学会発表](計11件)

岡本 謙、森重功一：画像処理による良否判定を用いた産業用ロボットによる研磨作業の自動化、型技術ワークショップ 2011 in 岐阜 講演論文集、pp.100-101 (2011.11.21、岐阜)
岡本 謙、森重功一：産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化 —統計的パターン認識に基づいた外観検査—、日本機械学会 2012 年度年次大会 DVD 論文集、G130012 (2012.9.10、金沢)
岡 頼陽、森重功一：Haptic Device を用いた多軸制御工作機械操作インターフェイスの開発 —立体視機能の追加と切削音の呈示—、2012 度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集、pp.573-574 (2012.9.14、北九州)
金子英司、森重功一：産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化 —切削用 NC データを利用したロボットプログラムの作製—、日本機械学会 第 9 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集、pp.99-100 (2012.10.27、秋田)
神田倫之、森重功一：構造干渉を考慮した 5 軸制御加工用工具経路生成法 —スピンドルチルト型工作機械への対応—、型技術ワークショップ 2012 in KOBE 講演論文集、pp.52-53 (2012.11.29、神戸)
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ーフェイスの開発 - 工具経路のリアルタイムスムージング -、2013 度精密工学会秋

季大会学術講演会講演論文集、pp.83-84 (2013.9.13、大阪)
桜井一範、森重功一：Haptic Device を用いた多軸制御工作機械操作インターフェイスの開発 - 未切削部分との干渉の回避 -、2013 度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、pp.85-86 (2013.9.13、大阪)
金子英司、森重功一：産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化 —切削用 NC データを利用したロボットプログラムの作成—、型技術ワークショップ 2013 in きたかみ 講演論文集、pp.60-61 (2013.11.28、北上)
郭 海霖、森重功一：5 軸制御加工における加工面全体の工具姿勢変化の最適化、日本機械学会 生産システム部門研究発表講演会 2014 講演論文集、pp.23-24 (2014.3.17、東京)
岡 頼陽、森重功一：Haptic Device を用いた旋盤加工用インタフェイスの開発、2014 度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、pp.1155-1156 (2014.3.19、東京)
金子英司、森重功一：産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化 —加工面上の離散点群に基づいたロボットプログラムの作成—、2014 度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、pp.1157-1158 (2014.3.19、東京)

[その他]

ホームページ：

<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・電気通信学部・准教授
研究者番号：90303015