

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14140

研究課題名（和文）ヘラ絞りにおける職人技術再現のための力触覚に基づいたシステム開発研究

研究課題名（英文）Development of the reproduction system for the craftsmanship in the metal spinning based on haptic information

研究代表者

八田 禎之（Hatta, Yoshiyuki）

岐阜大学・高等研究院・特任助教

研究者番号：80883305

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、職人作業の一つであるヘラ絞り加工の動作解析を目的にしたマスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置を開発した。本装置はヘラ絞り動作を可能とするためにパラレルリンク構造によって構成されている。本研究では、運動情報を関節空間から作業空間に変換する順運動学を、ニューラルネットワーク（NN）と非線形カルマンフィルタに基づいたモデルによって構築した。これにより、パラレルリンクロボットにおいて一般的にリアルタイムに導出できなかった順運動学の問題を解決した。そして、マスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置におけるバイラテラル制御を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、中小企業の技術を支える熟練作業員、いわゆる職人が減少しつつある。そのような職人作業の一つとして、ヘラ絞り加工があげられる。そのヘラ絞り加工の自動化が求められているが、それを実現する上でヘラ絞り加工時の人動作の解析が重要となる。本研究は、人動作を解析するためのマスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置を開発したことから、社会的意義を有していると言える。また、その装置開発を通じて、従来から課題であったパラレルリンクロボットの順運動学モデル問題を解決する手法を提案すると共にその有効性を示した点から、学術的にも大きな意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In this research, a metal spinning machine based on a master-slave system was developed for the purpose of analyzing the human motion in the metal spinning process, which is one of the artisanal tasks. This machine is constructed with parallel link structures to realize the process. In this research, a forward kinematics model based on neural networks (NN) and a nonlinear Kalman filter was developed as the forward kinematics to convert the motion information from joint space to workspace in real-time. It solves the problem of forward kinematics that cannot be generally calculated in parallel link robots. As a result, the bilateral control in the metal spinning machine was realized.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：バイラテラル制御 パラレルリンクロボット 順運動学 ヘラ絞り

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、航空業界は新型コロナウイルスの影響により経営が難しい状態となっているが、長期的にみると図 1 に示すように航空機の需要増加が予測されている。航空機の部品数は概ね百万点から二百万点と言われ、部品数十万点の自動車と比較して非常に多く、様々な企業から提供されている。それらの企業には大企業だけでなく中小企業も多分に含まれている。中小企業から提供される部品は自動工作機械で製作された部品から手作業で製作される部品まで数多く至る。

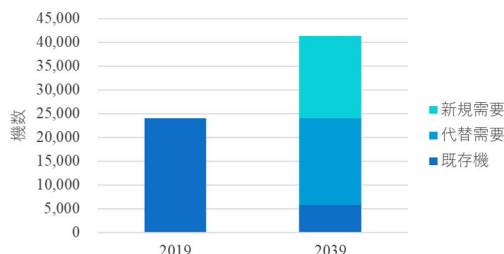


図 1 ジェット旅客機の需要予測結果  
出典：日本航空機開発協会「民間航空機に関する市場予測 2020-2039」

しかしながら、中小企業数は図 2 に示すように減少しつつあり、中小企業の技術を支える熟練作業員、いわゆる職人も減少しつつある。そのような減少しつつある職人作業の一つにヘラ絞り(図 3 参考)があげられる。

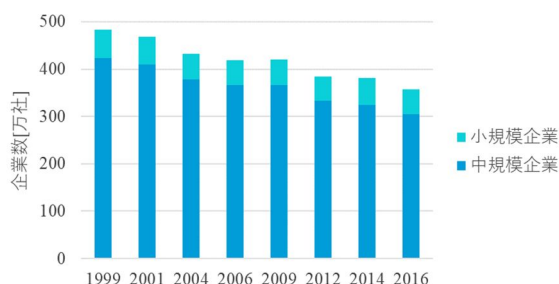


図 2 企業規模別企業数の推移  
出典：経済産業省「2019年版中小企業白書」



図 3 ヘラ絞りの作業現場  
出典：株式会社北嶋絞製作所  
(<http://www.kitajimashibori.co.jp>)

ヘラ絞りはスピニング加工の一種であり、図 4 に示すように平面状の金属を回転させながら「てこの原理」を利用してヘラを押し当て、金属を変形させる加工手法である。また、ヘラ絞りには、ヘラを複数回往復させながら素材を段階的に圧縮させて変形させる絞りスピニング(図 5 参照)と、ヘラを一往復させただけで素材を一度に引き伸ばして変形させるしごきスピニングがある。さらに、その二つをハイブリッドさせて加工する場合もある。職人の熟練度によっては NC マシンより高い精度の加工が可能であり、JAXA の H2 ロケットにおけるロケットブースタの先端部やエンジン部品もヘラ絞りによって製作された。今後航空機の需要が高まる中、職人の減少は緊急の課題であり、職人作業を再現可能な装置の開発が必要と言える。

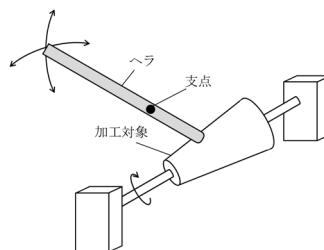


図 4 ヘラ絞りの概略図

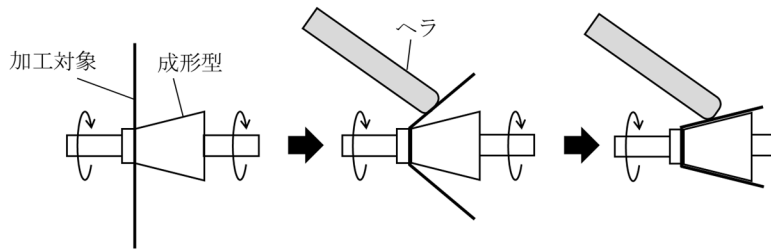


図 5 ヘラ絞り(絞りスピニング)における加工対象物の変化

自動スピニング加工機は予め設定された軌道に沿ってヘラに相当する工具を移動させる。一方、ヘラ絞りでは職人が手先に伝わる加工時の感触に応じてヘラを押し当てる力や動かす速さを調整する。すなわち、ヘラ絞りは物に触れた際の手ごたえとしての感覚である力触覚に応じた力及び位置の制御が必要であり、位置制御主体である従来の自動スピニング加工機とは別の制御が必要となる。これまで、自動スピニング加工機のしごきスピニングにおいて力制御の適用が提案されたが、絞りスピニングにおける力制御の適用はまだ達成されていない。

2. 研究の目的

ヘラ絞りでは加工対象である素材の加工具合を視覚及び力触覚で確認しながら作業者がヘラを操作する。したがって、ヘラ絞りにおける職人の技術を再現するためには、視覚及び力触覚に基づいた力及び位置の制御が必要である。しかしながら、上述したよう自動スピニング加工機で

は力触覚に応じた力及び位置制御が達成できていない。ヘラ絞りに適した力及び位置制御を実現させるためには、それを実現させている人のヘラ動作自体を解析する必要がある。

視覚による環境認識及びその活用に関する科学技術は発展が著しく、幅広い分野で利用されている。これに対して力触覚技術の実用は未だ少ない。力触覚の適用は、ヘラ絞りにおける動作を再現するにあたり視覚の適用より大きな課題である。そこで、本研究はヘラ絞りにおける力触覚とヘラ動作の相関関係を解析し、力触覚に基づく力及び位置制御モデルを構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

上記目的を達成するために次の2項目を実施する。

ヘラ動作を計測するためのマスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置の開発

上述したバイラテラル制御に基づいたマスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置を製作する。本装置は人が操作するマスタシステム及び加工対象に接触して加工するスレーブシステムから構成される。ヘラ絞り動作を実現する上で必要な設計要件をまとめ、その設計要件に基づいて装置の設計及び試作を行う。そして、本装置においてバイラテラル制御のための制御器を設計し、その制御器を実装する。

計測された動作に基づいて、力触覚とヘラ動作の関係の解析及びモデル化

上記マスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置を用いてヘラ絞りにおけるヘラ動作の計測を行う。また、その動作によって形成された素材の加工精度をレーザ変位計で計測する。計測された力触覚、ヘラの動作、素材の種類、加工形状及び加工精度の相関関係を求める。これにより、ヘラ絞りにおいて職人の技術を再現するために重要なヘラ動作を解明する。

### 4. 研究成果

本研究では愛巧ヘラ押工業株式会社(愛知県)の協力の下、マスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置において必要な出力、ヘラの可動範囲等の設計要件をまとめ、マスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置のハード設計及び製作を行った。設計したマスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置を図6に示す。また、それに基づいて製作した実機を図7に示す。

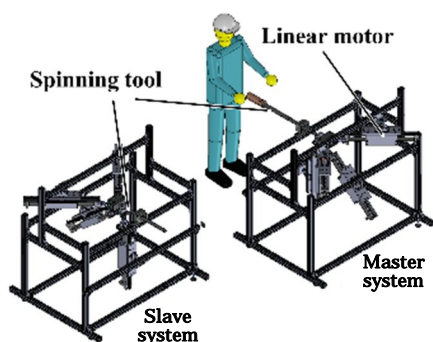


図6 マスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置(CADモデル)



図7 マスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置(実機)

本装置は、上図のようにパラレルリンク構造で構成されている。一般的に、パラレルリンクロボットは各モータの位置(角度)情報からロボット手先の位置情報を求める順運動学モデルを導出できず、ロボット手先の位置情報からモータの位置(角度)情報を求める逆運動学モデルのみ導出可能である。しかしながら、本装置はマスタ・スレーブシステム間において設置姿勢が異なるため、バイラテラル制御をロボット手先の位置情報に基づいて適用する必要があり、リアルタイムに順運動学を求める必要がある。

パラレルリンクロボットにおける順運動学に関する研究はこれまで多くの研究者によって行われてきた。順運動学を求める手法として、逆運動学モデルに基づいた非線形最小二乗法等の反復計算が提案されてきた。しかしながら、反復計算は計算負荷が大きく、1 ms 以下の制御周期が求められるバイラテラル制御に適応することが難しい。そこで、本研究ではニューラルネットワーク(NN)型順運動学モデルを用いた4ch型バイラテラル制御を提案した。本提案手法では、オフラインにおいて様々なモータの位置情報に対して反復計算により順運動学を求め、その反復計算の結果をNNモデルに学習させる。バイラテラル制御においてリアルタイムに順運動学を求める際には、そのNNモデルによって順運動学を求めることが可能となる。

本NN型順運動学モデルでは非線形カルマンフィルタを活用し、非線形カルマンフィルタにおいて必要となる状態方程式のうち非線形要素のみをNNモデルによって構築する。これにより、NNモデルのニューロン数及び層数が肥大することを防ぎ、NNモデルの計算時間を短縮してリアルタイム性を向上させた。本装置においてヘラ絞り動作を行う際の可動範囲に対してNNモデル型順運動学モデルを構築した結果、学習後のNNモデル型順運動学モデルにおいて順運動学を約0.4 ms未満で計算可能であることを示した。

また、NN型順運動学モデルを用いた4ch型バイラテラル制御として図8に示す制御手法を



構築した。本提案手法において人がマスタシステムを操作した際のシミュレーション結果を図 8 及び 9 に示す。図中におけるパラメータの添え字において、M はマスタシステムを示し、S はスレーブシステムの応答値を示す。図からマスタ・スレーブシステム間において位置追従が実現されているとともに、力の作用反作用が再現されていることを確認した。すなわち、バイラテラル制御が実現され、マスタ・スレーブシステム間において触覚情報の伝達が行われおり、本提案手法の有効性が確認できる。

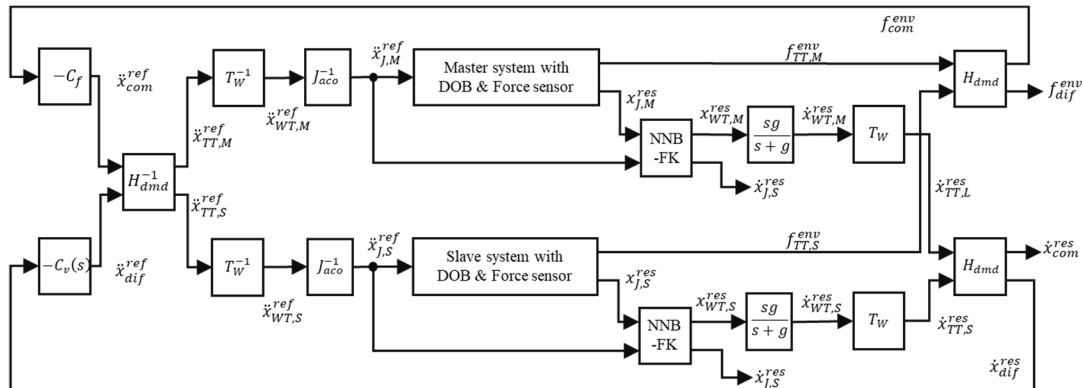


図 7 ニューラルネットワーク型順運動学モデルを用いた 4ch 型バイラテラル制御のブロック線図

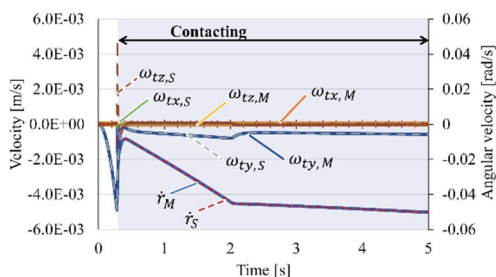


図 8 速度応答値

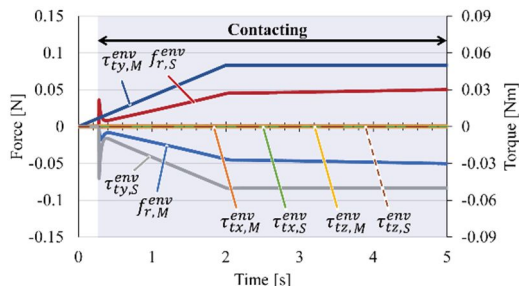


図 9 力応答値

このように、従来導出することが難しかった順運動学モデルを NN モデルと非線形カルマンフィルタによって構築可能であることを示して、本マスタ・スレーブシステム型ヘラ絞り装置を構築するだけでなく、パラレルリンクロボット自体の制御技術の向上に貢献した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 八田禎之, 伊藤和晃
2. 発表標題 熟練作業者のヘラ絞り加工における動作解析のためのバイラテラルシステム開発
3. 学会等名 東海支部第72期講演会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2023 (TEC23)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------