

振動ノミを装備したロボットによる装飾部位の加工に関する研究 Adaptive robotic carving by vibration chisel in Japanese traditional wooden architecture's sculpture part Manufacturing

○大谷 星輝*1, 中村 優介*2, 古庄 玄樹*3, 加戸 啓太*4, 平沢 岳人*5
Seiki Otani*1, Yusuke Nakamura*2, Genki Furusho*3, Keita Kado*4 and Gakuhiro Hirasawa*5

*1 千葉大学大学院 融合理工学府 博士前期課程

Graduate Student, Graduate School of Sci. and Eng., Chiba University.

*2 千葉大学大学院 融合理工学府 博士後期課程 修士 (工学)、日本学術振興会 特別研究員 DC2

JSPS Research Fellow, Graduate Student, Graduate School of Sci. and Eng., Chiba University.

*3 千葉大学大学院 融合理工学府 博士後期課程 修士 (工学)

Graduate Student, Graduate School of Sci. and Eng., Chiba University.

*4 千葉大学大学院 助教 博士 (工学)

Assistant Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University.

*5 千葉大学大学院 教授 博士 (工学)

Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University.

キーワード：デジタルファブ리케이션; 伝統木造建築; CAM

Keywords: Digital fabrication; Japanese Traditional Wooden Architecture; Computer Aided Manufacturing.

1. はじめに

人工技能とは吉川^{註1}によれば、人間の技能作業を機械化することと定義される。現在日本は少子高齢化社会と言われており、日本の建設業は慢性的な人手不足の問題を抱えている。人手不足に伴う問題として、日本の伝統文化を担ってきた伝統木造建築の技能の担い手が大幅に減少することが挙げられる。現在のペースで伝統木造建築の技能の担い手が減少し続けた場合、伝統木造建築の制作において人が担う作業の割合が高い現在の環境では、十分な保全が難しくなるだろう。伝統木造建築における人工技能の研究により、人が人にしかできない仕事に注力できるようになることで、少人数での制作を可能とし、日本における伝統木造建築の文化の保全において有効な手段の一つになると考える。

筆者らの所属する研究室では以前より、建築分野における人工技能の研究に取り組んでおり、6軸多関節ロボット(以下ロボット)による伝統木造建築を対象とした木部品の加工に関する研究を行っている^{2,4,5}。1/5スケールの五重塔の部分模型の制作に際し、丸ノコやミルなど様々なツールが加工部位に応じて使い分けられており、継手の直線的な入隅部の加工においては振動ノミが用いられている。

伝統木造建築の加工対象としては、軸部の継手のほかに、木鼻や虹梁の模様などといった装飾的な部位も存在する。一般に、装飾部位のような曲面の加工においては、ミリング加工が用いられる³。ミリング加工は主に金属加工の分野で用いられ、自由な形状の加工が可能である。しかし、

ミリング加工は、刃を高速回転させワークから不必要な部分を削り出す手法であるため、ミルの直径より細かい形状の加工は難しく、直線的なエッジを持つ入隅部などの加工では入隅部が残ってしまう。一方、振動ノミ加工は、ノミ刃の端部が鋭角であるため、このような入隅部の加工が可能である。この特徴は、装飾部材の入隅部においても適用可能であると考えた。

そこで本研究では、振動ノミをロボットに装備させ、伝統木造建築の装飾部位の入隅部に対し、加工を行い検証した結果を報告する。

2. 研究概要

本稿では、まず、振動ノミを装備したロボットを用いた加工手法について考察を行う。次に、考察をもとに振動ノミのツールパスの生成の方法を検討する。ミリング加工においてはツールパスを生成する手法として市販のCAMの機能が用いられることが多い。しかし、振動ノミのツールパスを生成するものは存在しない。そこで、振動ノミ加工用のツールパス生成システムを開発した。最後に、開発したシステムを用い、検証実験を行う。木鼻の彫り物に典型的なW字の切り欠き形状を対象として、集成材に振動ノミ加工を施し、ミリング加工との加工結果の比較を行う。

2.1. 実験環境

本検証を実施した環境を図1に示す。アルミフレームでロボットの台とワーク台を制作した。これら同士はアルミフレームで緊結し、一体とすることで、相対的な位置関係

がずれないように工夫した。また、これまでの経験上、ワークの高さは、ロボットの第一軸と同じ高さであるほうが作業範囲を有効利用できるため、本実験においても、高さをそろえた。

ロボットには FANUC 社製 CR-7iA/L を使用した。このロボットのエンドエフェクタに振動ノミを装備した。また、ワークには集成材を用いた。

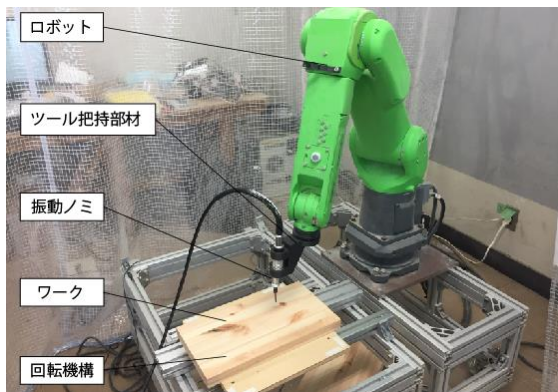


図 1 加工環境

2.2. 振動ノミ

振動ノミとは刃先が細かく振動することにより一般的なノミと比較し、少ない力で切削することが可能なツールである。通常のノミでは、加工に際しハンマーなどにより衝撃力を加える必要があるが、振動ノミの場合はその必要がなく、ロボットへの装備が行いやすい。

今回の実験に使用した振動ノミを図 2 に示す。刃には、その形状から大きく分けて、丸ノミ、三角ノミ、平ノミの 3 種類があるが、検証では、加工対象とする断面形状の加工において、職人が用いることが多い平ノミを用いた。

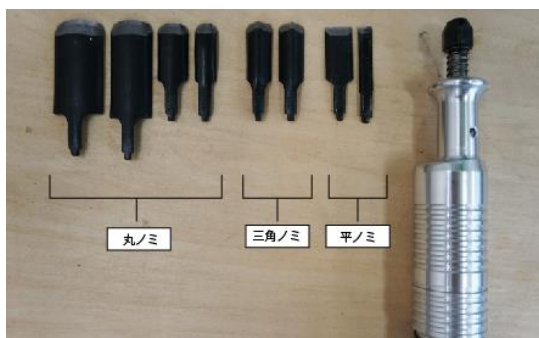


図 2 使用した振動ノミ

2.3. 加工対象

伝統木造建築における装飾部位は時代の変遷とともにその形状を変化させてきた。例えば、木鼻には獅子や猿、龍頭など様々な形状が存在する⁶⁾。ここでは、唐草模様を用いられる W 字の切り欠き形状に着目し、それを円状に

掃引したものを加工対象とする (図 3)。モデリングには、3次元 CAD ソフトウェアである Rhinoceros^{注3)}を用いた。

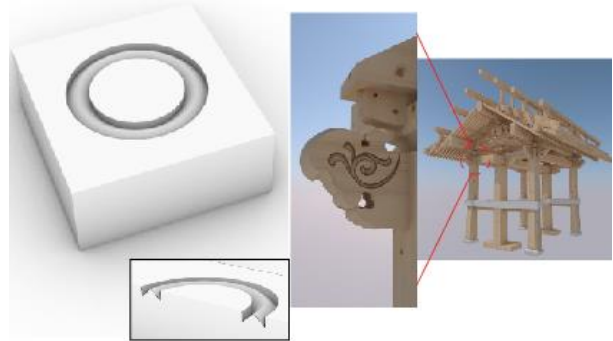


図 3 加工対象とする円

3. 振動ノミ加工

3.1. 加工手法

加工方法の決定に際し、振動ノミによる加工の特性を検討する。振動ノミは刃をワークに深く突き刺すと、ワークとの摩擦により振動が停止してしまうため、一度に削り取ることができる深さには制限がある。図 4 左のように、層状に削り取る手法を考案した。また、ノミは片刃であるため、刃の面の使い分けがある (以降、図 4 に示すよう a 面、b 面とする)。図 4 右は V 字の切り欠き形状を加工する際の流れを示したものである。まず、①の動作でノミをワークに垂直に進入させる。この際一般的なノミの使用法を参考に、a 面が加工形状に沿うようにする。次に、②の動作で、b 面が層と平行になるように動かし加工を行う。a 面はノミの軸と平行であるのに対し、b 面は角度があるため、動かす方向が軸とは異なる点に注意が必要である。これら一連の動作を目標の形状に到達するまで繰り返す。

一層あたりの深さは、検証用の集成材と同じワークを用いた予備試験を行い、1mm と設定したが、樹種により摩擦係数等の諸条件が変化するため、深さは素材ごとに調節する必要があると考えられる。

また、加工実験の様子を図 5 に示す。W 字の切り欠き形状の加工は、V 字の切り欠き形状の加工を 2 度適用することで行う。

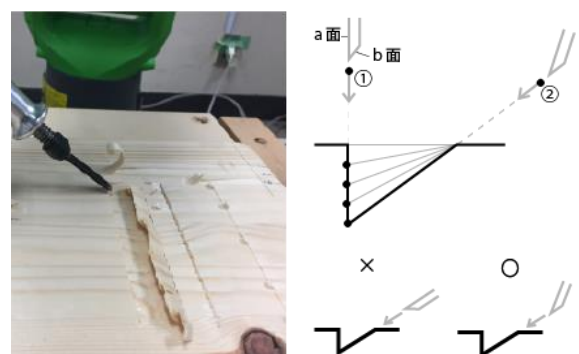


図 4 層状に削り取る加工の様子 (左) 加工手順 (右)

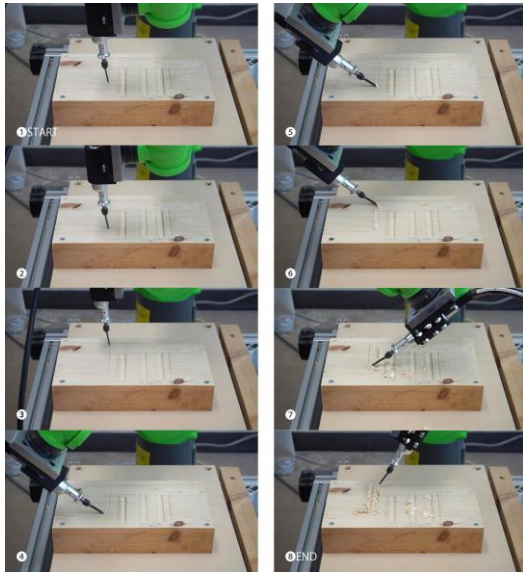


図 5 加工の様子

は、ロボットの可動域による制限がきつくなる。例えば、W 字の切り欠き形状を円状に掃引したものに様々な方向から振動ノミを進入させる必要があるものは、この制限にかかりやすい。この問題を解決するために、ワークを適宜回転させるための回転機構を設けた (図 7)。

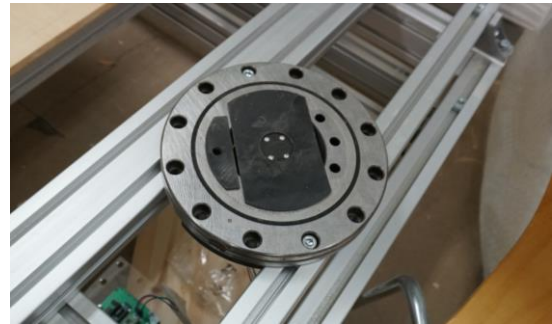


図 7 回転機構

3.2 ツール座標系の設定と制御

ロボットを制御し、加工をするためには、ツールの座標系をツールに応じて設定する必要がある。座標系の設定に必要な情報は、フランジから見たツール先端の座標 X,Y,Z と X,Y,Z 軸周りの回転を表す W(yaw),P(pitch),R(roll)である。座標系はツールの先端部分に図 6 のようにツールの座標系を設定した。このツール座標が指定した作業座標に向かわせるようにロボットを向かわせることで制御を行う。

ミリング、特にボールミルでの加工の場合、基本的には、ツール先端の位置のみ注意すればよいが、振動ノミの場合、切り欠き形状に沿って侵入させる必要があり、また、面の使い分けも要するので、位置のみでなく、姿勢も適切に設定し制御しなければならない。

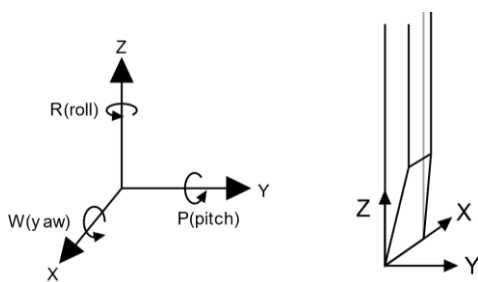


図 6 設定したツール座標系

4. ツールパスの生成

振動ノミ用の CAM は存在せず、既存の CAM で生成したパスを改変して用いることもできない。そこで、試験的に振動ノミ加工用のツールパス生成システムを独自に開発した。

図 8 は、円形の外側の V 字の切り欠き形状のパスを示しているが、V 字を定める 3 本のエッジを指定することで導出が行われる。導出したツールパス(X,Y,Z,R,P,W)に加え、ロボットの姿勢指定等の各種パラメータをテキストファイルとして出力し (図 9)、これをロボットに入力して加工を行う。これらは、Rhinoceros 上の Grasshopper に、Python による拡張コンポーネントを加え実装した。

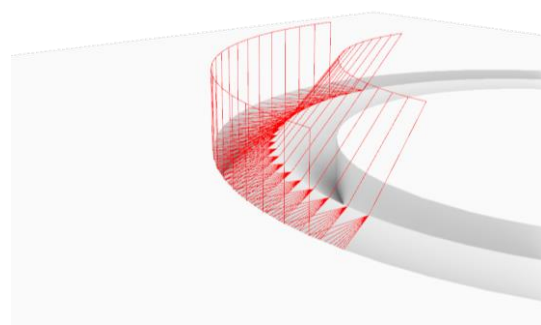


図 8 ツールパス生成の様子

3.3 回転機構の追加

ミリング加工は、ロボットを用いた彫刻で使用されることが多く、基本的には 3 軸加工や 5 軸加工で加工が可能であり、高速回転するツールの先端で削り出すため、前述のように加工時の位置・姿勢に留意すべきポイントが少ない。それに対し、振動ノミ加工はノミの性質上、6 軸すべてを指定する加工が多い。そのため、振動ノミを用いた加工で

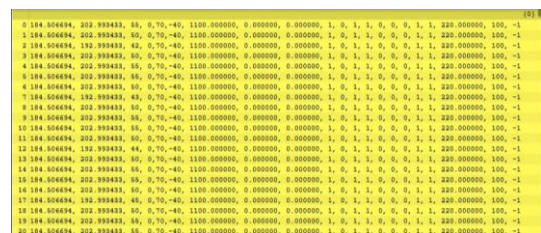


図 9 出力したツールパスの例

5. 振動ノミを用いた加工の検証

5.1. 振動ノミ加工とミリング加工の比較

振動ノミの可用性を検証するために、ボールミルと振動ノミで同じ形状を加工し比較を行った。使用した振動ノミは、刃幅 6mm、振動数 8000 回/分のものであり、ボールミルは直径 6mm、12000 回転/分のものである。実験では、W 字の切り欠き形状を対象として、幅 30mm、深さ 10mm のパターン、幅 20mm、深さ 8mm のパターン、幅 10mm、深さ 4mm のパターン、計 3 パターンを加工した (図 10、図 11)。これらの寸法は、実際の装飾部位に使われ得る寸法を想定し、決めたものである。加工結果を観察すると、振動ノミ加工では、入隅部のエッジが出ていることが確認できる一方、ミリング加工による加工形状は隅部が丸みを帯びており、形状を適切に加工できていないことが分かる。



図 10 加工対象のモデル



図 11 振動ノミ加工 (左)・ミリング加工 (右)

5.2. 装飾部位の断面形状を有した円への適用

W 字の切り欠き形状を円上に掃引した形状 (図 3) を振動ノミで加工した結果を図 12 に示す。隅部に荒れが残る部分もあるが、概ね良好に加工できている。荒れは、検証に用いた集成材の繊維の影響だと考えられる。



図 12 円形の加工結果

6. まとめと展望

建築分野における人工技能化の試みとして、伝統木造建築の木鼻の唐草模様用いられる W 字の切り欠き形状を対象として振動ノミ加工を行い、検証した結果を示した。

ロボットを用いた振動ノミ加工が実現すると、従来は、人が行う必要があった装飾部位の加工をロボットで行うことが可能になり、結果として、人は人にしかできない重要な仕事に注力することが可能となる。装飾部位のロボット加工が可能となれば日本の資産である文化財の保全にかかるコストと時間を軽減する一助となり、より多くの文化財の保全が可能となるだろう。

今後、ほかの装飾部位に使用される形状の振動ノミを用いた加工方法を考察する。さらに、ツールパスの生成方法について考察を加え、より合理的な加工システムについて模索していく予定である。

[注釈]

- 注1. 吉川 恒夫:人工技能, 技能の理解とその機械, 1998 年 37 巻 7 号 p. 465-470
- 注2. CNC 工作機を制御するための加工プログラムを作成するためのソフトウェア。
- 注3. フリーフォーム NURBS モデリングに特化した 3 次元 CAD ソフトウェア。URL: <https://www.rhino3d.co.jp/>

[参考文献]

- 1). Hiroki Takabayashi, Keita Kado, Gakuhiro Hirasawa: Versatile Robotic Wood Processing Based on Analysis of Parts Processing of Japanese Traditional Wooden Buildings Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018 p221-231
- 2). Giulio Brugnaro, Sean Hanna: Adaptive Robotic Carving Training Methods for the Integration of Material Performances in Timber Manufacturing, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018 p336-348
- 3). James Hayes, Stephen Fai, Shawn Kretz, Christian Ouimet: Phil White Digitally-Assisted Stone Carving of a Relief Sculpture for the Parliament Buildings National Historic Site of Canada, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences . 2015, Vol. 2 Issue 5/W3, p97-103.
- 4). 高林 弘樹, 元池 遼, 加戸 啓太, 平沢 岳人: 多関節ロボットによる木材加工におけるツールパス生成に関する研究 日本建築学会技術報告集 2016 年 22 巻 51 号 p813-816
- 5). 高林 弘樹, 元池 遼, 會田健太郎, 加戸 啓太, 平沢 岳人: 多関節ロボットによる伝統木造構法の部品加工に関する研究, 日本建築学会技術報告集 第 22 巻 第 50 号, p331-334, 2016 年 2 月
- 6). 鶴功: 図解寺社建築 各部構造/理工学社 1993 年
- 7). 富樫: 大工 寺ひな形/理工学社 2004 年