

五軸 CNC 切削機を用いたひねり嵌合形式の木組みの開発

Development of twist fitting type wooden joints using 5-axis CNC cutting machine

学籍番号 47-206741

氏名 宮野 公輔 (Miyano, Kousuke)

指導教員 佐藤 淳 准教授

1. 序

1.1 背景

日本の伝統木造社寺建築物に見られる、金物を使用せずに材を接合する木組み技術は、近年の自然素材への関心から世界中から注目を集めている。

建築分野では情報技術の発達でパラメトリックデザインなどのデザイン手法が普及し、複雑な形態の建築設計が実践されるようになった。またデジタルファブリケーションの実用性向上でその施工例も増えている。

デジタルファブリケーションの一つである CNC 切削機は XYZ 直線三軸のものが長く主流だったが、これに複数回転軸を加えた五軸や六軸以上の CNC 切削機が普及し始め、建築生産の現場でも特定の形状で木材のプレカットが可能になり、今まで職人に頼っていた複雑な形状も生産可能になった。

1.2 既往研究

以上の背景から近年木組みとデジタル技術に関する研究は増加傾向で、五軸加工機関連では 2015 年に装置の開発が行われ¹⁾、その後も加工性能向上が進められている²⁾。また五軸加工機での新たな構法として、既存の木組み技術のパラメトリックデザイン化が示されている。³⁾

この分野の研究は加工性向上や設計から施工まで一貫した構法の開発を目的とする

ものが殆どだが、「自由度の高い加工機械を前提にすれば、いままで実用化が難しかったディテールの実現もありうる」³⁾と期待されており、五軸加工機によってしか加工できない新たな木組みを開発することが今後の木組み技術の発展につながると考えられる。

五軸加工機を用いた新たな木組み開発として金輪継ぎを元にしたもの⁵⁾と相欠きを元にしたもの⁶⁾があるが、どちらも既存の木組み同様に直線運動で組み合わせることができる形式である。

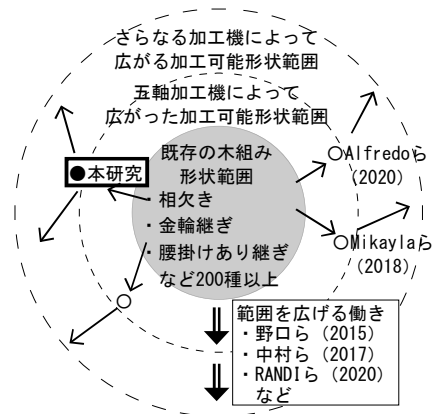


図 1. 本研究と既往研究の位置づけと展望

1.3 研究目的

本研究は五軸 CNC 切削機を用いなければ刻めない、人の手では多数の加工が困難なひねり嵌合形式の木組みを提案すると共にこれを用いて組むことのできる骨組を示すことでさらなる木組みの発展を促す。

2. 研究方法

2.1. 使用する装置及びソフトウェア

五軸 CNC 切削機としてカスタマイズ可能な 5AXISMAKER (切削領域 600 mm × 600 mm × 600 mm) (図 2) を使用し、切削ヘッドを操作するプログラミング言語 g-code を読み込むソフトウェアとして Mach3 を使用する。また 3D モデリングや g-code の生成には 3D モデリングツール Rhinoceros とその Grasshopper プラグインを用いる。



図 2. 5AXISMAKER

2.2. 制御法開発の流れ

制御法開発の流れは以下の通り (図 3)。

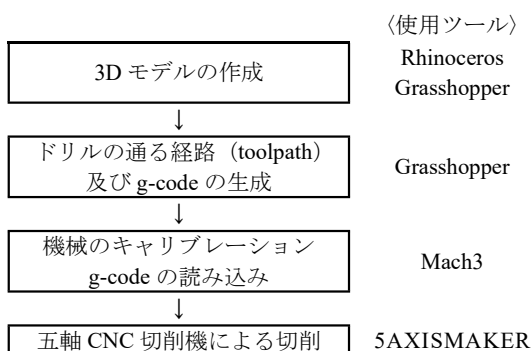


図 3. 木組み開発フロー図

2.3. 3D モデルの作成

一般的な相欠きの木組みを参考に材と材が交差する木組みを設計する。木組みはダボなど使用しなければ必ず一方にはスライドできるが、それが回転方向であれば軸方向応力やせん断応力は伝達でき、骨組形状の可能性を増すことができる。以上を踏

まえ、材同士の交差角及び各材のひねり角が自由、かつひねり動作により嵌合する木組みモデルを提案する。

組んだ時は同じに見えるが、ひねるときの回転軸が違う 2 タイプの木組みを考案した。以下で示す 2 タイプの交差角、ひねり角、材間距離は同一とする (交差角 60° 垂直材ひねり角 10°、水平材ひねり角 15°、材と材の距離 10 mm、材断面 24 mm × 24 mm)。

・タイプ①

回転軸を材と材の交差部である六面体の一辺とする。

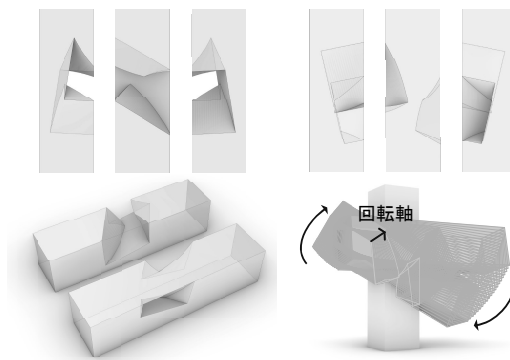


図 4. タイプ①の刻み及びひねり嵌合の様子

・タイプ②

回転軸の向きを自由に設定する。ただし交差角、ひねり角、材間距離に制限が生じる。一方で骨組を組む際には複数の接合部で回転軸を揃える必要があり、このタイプが適している。

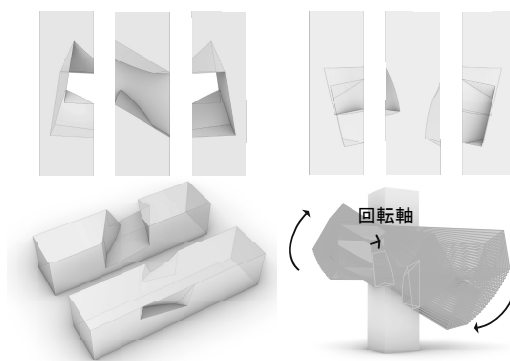


図 5. タイプ②の刻み及びひねり嵌合の様子

本研究での木組み形状は三軸 CNC 切削機では材を回したり斜めに設置することなしに削ることができない形状なため五軸 CNC 切削機の使用に適していると言える。

2.4. 制御プログラムの生成

ドリルの先端が動く軌跡（以下 toolpath）及びそれを実現するヘッドの動作（XYZ 座標と BC 回転角で表現）（図 6）の g-code プログラムを Grasshopper で設計した。

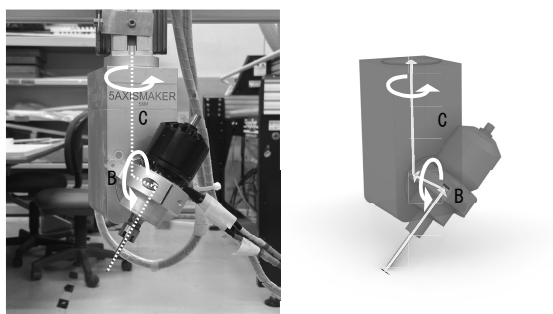


図 6. ドリルの軸と回転角 BC

プログラムは使用するドリルの形状に応じて面の切削用と凹エッジの切削（Edge finishing）の二つを生成した。また面の切削では、木材を大まかに削る Roughing、精緻に各面を仕上げる Finishing 1、2（2は1と削る向きを変え、表面をより滑らかにする）、これら三つをまとめて一つの g-code を生成する g-code generator の 4 つの Grasshopper プラグインを使用する。Roughing、Finishing、Edge finishing の toolpath を図 7、8 に示す。

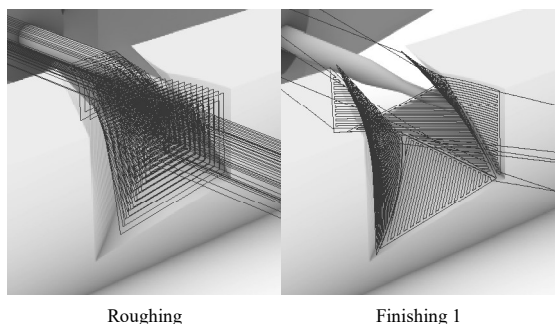


図 7. 各種プログラムでの toolpath

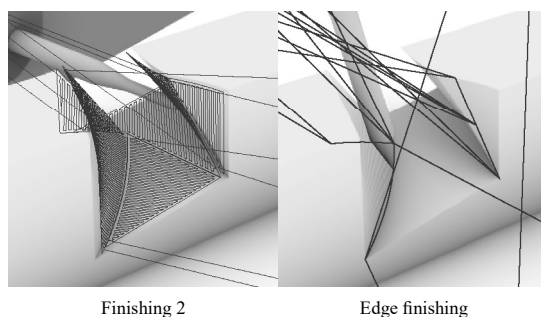


図 8. 各種プログラムでの toolpath

2.5. 装置のキャリブレーション

5AXISMAKER で実際に切削を行う前に装置の座標軸と削る材の座標軸を揃える必要がある。Mach3 でドリルを操作し、目視でドリルの先端を材の原点に合わせる。この時ヘッド B 回転軸からドリル先端までの距離も測定しプログラムに反映させる。

3. 結果・考察

3.1. 切削結果

木材は 24 mm × 24 mm のパイン材を使用した。切削の様子と結果を図 9 に示す。

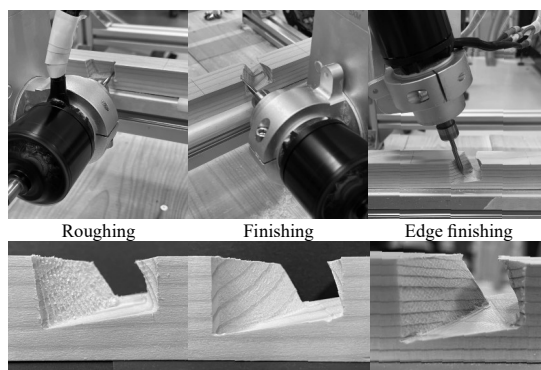


図 9. 各段階での切削の様子と結果

加工時間は Roughing、Finishing 1、2 共に平均で約 10 分で Edge finishing は平均約 5 分、機械のキャリブレーション、ドリルの交換も含めると一部材につき合計約 45 分となった。切削結果は各段階で目指している形状を殆ど再現できたが、鋭角なエッジの精度や平滑などに課題が残った（図 10）。

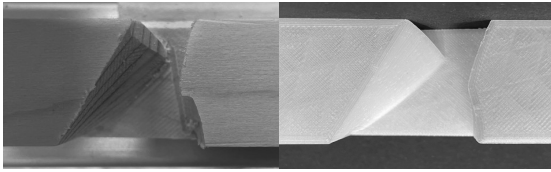


図 10. 3D プリントしたものとの比較

原因として手動でのキャリブレーションやドリルの距離測定の見誤差、装置全体の固定度のバラつきが挙げられる。

3.2. 嵌め合い性状の考察

本研究で提案する木組みの挙動を分析した。この木組みは刻み面の殆どが曲面であるため材同士の位置関係が一意に決まり、嵌め始めから終わりまで設定した軌跡から外れず滑らかに動作した (図 11)。

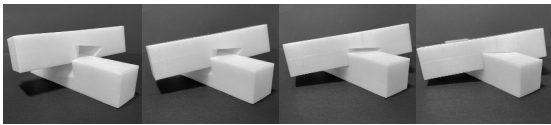


図 11. ひねり嵌合の様子

嵌合後は図 12 の丸印部分が掛り合うことと刻み面の摩擦により回転軸方向に引張を与えても簡単に外れることはなかった。嵌合する方向にせん断力が発生しても外れないとも言える。

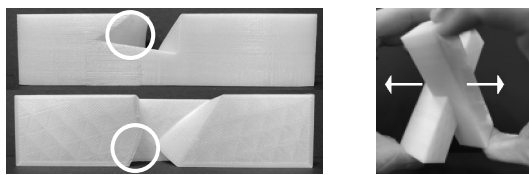


図 12. 本研究の木組みの特徴を生み出す部分

3.3. 骨組形状の提案

本研究の木組みの特徴を活かす方法の一つとして、木組みが締まる方向に回転力を加えることが考えられ、その骨組の一つに図 13 のようなアーチ構造が挙げられる。

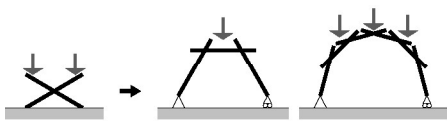
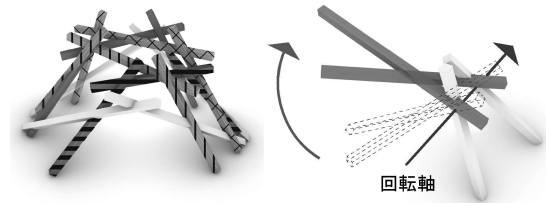


図 13. 本研究の木組みの特性を活かす骨組構造

アーチを立体的に組み込んでいくことで以下のような全体形が考えられる (図 14 左)。また施工手順として X を一つのユニットとし、ユニット同士の接合はタイプ②を用いて回転軸を一致させた刻み方にすれば組むことが可能であると考えられる。



四種のアーチで構成

図 14. 全体形と考える施工法

4. まとめ

本研究では五軸 CNC 切削機を用いた新たな木組みとして、ひねり嵌合式の木組みを提案し、切削のための装置制御法を開発すると共にその特徴を活かす骨組形状を提案した。

今後の課題としては、この木組み形状の構造性能の把握、五軸 CNC 切削機の制御法の精緻化や簡素化、汎用化が挙げられる。

<参考文献>

- 野口 傑史、元池 遼、會田 健太郎、高林 弘樹、田中 智己、平沢 岳人：汎用的な部品加工を目的とした五軸加工機の制作、日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 37-38, 2015. 9
- 古庄 玄樹、吉岡 直希、Randi HANTORO、大谷 星輝、中村 優介、加戸 啓太、平沢 岳人：ATC 付き五軸加工機のフォーリー制作を通じた可用性検討、日本建築学会情報システム技術委員会 第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, p. 346-349, 2019. 12
- 中村 優介、高橋 雅生、戸田 勇登、林 真那、高林 弘樹、加戸 啓太、平沢 岳人：五軸加工機による校倉構法の断面加工に関する研究 -多軸加工によるあたらしい建築構法の創出研究 その1-, 日本建築学会技術報告集 第24巻 第56号, p. 447-450, 2018. 2
- Mikayla Heesterman, Kevin Sweet: Robotic Connections: Customisable Joints for Timber Construction, XXII CONGRESSO INTERNAZIONALE DA SOCIETADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, p. 1-8, 2018.11
- Alfredo Salgado Ferrer, Fabrizio Tozzoli: Digital Timber Reciprocity, 2020.2, issuu, <https://issuu.com/alfredosalgadoib/docs/portfolio.final>, (最終閲覧日2022年1月9日)