丸ノコツールのパス自動生成システムの開発と留めで構成する木質ドームの制作

多軸加工によるあたらしい建築構法の創出研究 その2

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC PATH DERIVING SYSTEM FOR CIRCULAR SAW AND PRODUCTION OF WOODEN DOME WITH MITER JOINTS

New building system with multi-axis machining 2

中村優介 — * 1 古庄玄樹 — * 2
林 真那 — * 2 漆山生羽 — * 2
加戸啓太 — * 3 平沢岳人 — * 4

Yusuke NAKAMURA — * 1 Genki FURUSHO — * 2
Mana HAYASHI — * 2 Ikuha URUSHIYAMA — * 2
Keita KADO — * 3 Gakuhiro HIRASAWA — * 4

キーワード：
五軸加工機, 木質カテナリドーム, 数値制御, 建築構法

Keywords:
5-axis machine, Wooden catenary dome, Numerical control machining, Building system

Five-axis machines are capable of complicated movement; however, their operation requires both experience and knowledge. For applying these machines to diversified small-quantity production, a sophisticated operating system that assists the operation in deriving the toolpath and avoiding errors is indispensable. From this perspective, the authors attempted to develop an automatic toolpath deriving method that detects processable polygons with a circular saw by analyzing a target geometry. A movement simulation method was also developed to ensure safety in operation. This paper reports the implementation of the system, and its validation through building a catenary dome that has miter joints.

1. はじめに

前報¹⁾では、独自に開発した五軸加工機の仕様を詳説し、五軸加工機を用いて実現できる校倉(井楼組)構法の考察を通して既存の五軸加工機の適用範囲を拡張できることを示した。数値制御による多軸加工機の潜在的な可能性については、これらの機械が徐々にではあるが普及しはじめていることから客観的に認められる²⁾が、多軸加工機を含む生産系としてみれば、その可能性を充分に活かせる運用システムは現時点で構築されていない。

筆者らは、従来ならば高コスト等の要因により実用化できなかった納まりを具現化することを直接的な目標として、建築構法の観点からみた妥当性を意識しながら、数値制御多軸加工機の開発・改良に継続的に取り組んでいる。本報では、数値制御多軸加工機を含む生産システムの一般への普及を念頭に、新たに開発した五軸加工機に関して、集材材による木質ドームの設計制作の過程を通して具体的に報告する。

2. 新型五軸加工機での改良点

前報の旧型五軸加工機では、加工機を構成する要素機能の実装と検証に注力したため、普及を目的とした場合には改良すべき点が多く残されていた。新型五軸加工機(図1)では、加工機を実際に操作するオペレータの存在を想定した場合に問題となる項目を中心に直しを進めた。

ハードウェアの変更ではX軸でワークを移動させる方式を改め、

ワーク固定式のガントリー型とした。幅900mm、奥行き760mm、高さ1100mmの直方体フレームを躯体とし、X軸を含めた全軸をツールの動きに用いる。これによりフレームの内部を最大限に活用できる可動域を実現した。また3つの直動軸にはエンコーダ付きモータを採用し、加工不良につながる脱調を検知した際には停止するようにした。新型五軸加工機の大きさは旧型の約半分であり、普通車に積載できるものとなった。このため、施工現場に加工機を搬入しその場で部材加工することも可能である³⁾。

次にソフトウェア面の変更について述べる。各軸モータの制御は独自のプログラムを用いてマイクロコンピュータを介して行っていたが、より精密な制御が可能なオープンソースのCNCソフトウェアであるLinuxCNCに置き換えた。また、加工機に送る加工パスは独自文法によるコマンド列として記述していたが、これを汎用的なCNCコマンドであるG-codeへ変更した。併せて、加工パスの導出はフリーソフトウェアFreeCAD内で動作するアドオンとして独自に開発したものを、後述するようなパス導出アルゴリズム等を整理した上で、商用ゲームエンジンUnityを用いた独立したプログラムに置き換えた。旧型に比べ、より直感的な操作が可能となった。

ところで、安全で失敗のない加工のためには、五軸加工機のツールの動きを完全に管理することが求められるが、導出された加工パスのコマンド列を見てもその動きを予測することは困難である。また、五軸加工機の一般の状況としては、ワーク把持の方法やツールの大きさなど多様なものが考えられ、これらも考慮する必要がある。

¹⁾ 千葉大学大学院融合理工学府創成工学専攻建築学コース 博士後期課程1年 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

²⁾ 千葉大学大学院融合理工学府創成工学専攻建築学コース 博士前期課程2年

³⁾ 千葉大学大学院工学研究院創成工学専攻建築学コース 助教

⁴⁾ 千葉大学大学院工学研究院創成工学専攻建築学コース 教授

¹⁾ Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ.

²⁾ Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ.

³⁾ Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

⁴⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

そこで、仮想の五軸加工機でコマンド列を実行するシミュレーションを同じく Unity 上で開発した。ワークの支持台や五軸加工機本体、粉塵対策のための外周パネルなどとツールとの接触の有無を事前に把握し、加工パスの妥当性と加工の安全性を担保できる。

このように、新型機での改良点が多いが、これらのうちでも特に重要な加工パス生成に関して次節で詳説する。その理由は、実用を想定した場合、パス生成のプロセスが難解ならば加工機を使いこなすことは困難となり、理解しやすく扱い易いプロセスならば、オペレータ・フレンドリーなシステムになると考えられるからである。

図 1 開発した五軸加工機

3. 丸ノコツールのパス生成ロジックについて

3.1. 用いるツールについて

五軸加工機で使用するツールは丸ノコに限らず、様々なものが考えられるが、以下の理由から丸ノコに限定して検討を行う。

1. ミリングに比べて加工が圧倒的に速く、加工が平面的であるという制約を考慮してもアドバンテージが大きい。
2. ミリングに比べて加工パスの生成がやや難しい。ミリングは汎用的なパス生成手法がよく整理されており商用システムも充実しているが丸ノコには存在せず研究開発の余地が大きい。

3.2. 丸ノコで加工可能な面の判定

前報では、丸ノコで加工可能な形状を成す切断面について 3 パターンに分類した。その際、加工する面に対しノコ刃を動かす方向に通り抜けられることを加工可能な条件とし、その判定はパス生成を行うオペレータが行っていた。オペレータの判断に頼らずに加工可能性を判定できるシステムとするために判定のロジックを整理した。

まず、丸ノコが加工中に通過する軌跡の幾何形状は半平面とみなすことができる。この半平面は加工によって現れる平面とノコ刃の先端が通るエッジから定義される(図 2)。この半平面が部材の 3 次元モデルの完成形状(以下、ターゲット形状とする)と干渉しなければ、加工可能であると決定できる。以下、半平面を定義するエッジを「エッジ I」、干渉するかどうか判定するエッジを「エッジ II」とする。ターゲット形状から次の繰り返し手順で丸ノコにおける加工

の可否を決定する。

- ① ターゲット形状から、判定する平面とエッジ I を取得し、半平面を定義する。
- ② ターゲット形状から、エッジ II を 1 つ取得する。
- ③ エッジ II の 2 つの端点が、互いに半平面の同じ側にある場合、半平面と交差することはないため、残りの辺を選択しエッジ II として②に戻る。
- ④ エッジ II の 2 つの端点が互いに半平面の異なる側にある場合、半平面を延長した平面とエッジ II との交点の位置を求める。
 - ④-1 ④の交点が半平面上に位置しているとき(図 3)、ターゲット形状と①で選んだ半平面が干渉しているとし、加工不可と判断して繰り返し手順を終了する。
 - ④-2 ④の交点が半平面上にないとき、干渉はしていないため、残りの辺を選択しエッジ II として②に戻る。
- ⑤ ターゲット形状のエッジ II 全候補について探索し、干渉が 1 つもなければ①で選んだ半平面はターゲット形状と干渉せず、加工可能であると判断する。

図 2 加工可能な面と半平面

図 3 加工不可な面の例 太く示された「エッジ II」が半平面と交点をもつ

3.3. 加工可能な面の分類

加工可能と判断された面は、その定義からすべて切り落としで加工が可能である。また加工可能な面のうち、共通のエッジを持つ場合は、腰掛け加工としても加工可能である(図 4 左)。溝加工は、加工可能な面のうち、共通した隣接面を持つ場合が該当する(図 4 右)。

図 4 (左)腰掛け加工 (右)溝加工

3.4. 迂回パスの導出

加工可能形状それぞれについて加工パスコマンド列を生成するアルゴリズムを実装する。このアルゴリズムを用いて導出される、加工パターンのみに対応するパスを、加工単位パスと呼ぶこととする。加工単位パスのパラメータとしては、ツールの送り速度や切削方向(アップカット・ダウンカット)などが含まれる。

部材におけるすべての加工単位パスを導出したのち、各加工単位パスを結ぶための迂回パスを設定し、各加工単位パス間に挿入する。迂回の動作は3つの動作に分けられる。

- i. 加工の終点から、姿勢を保ったままワークを抜ける。
- ii. 姿勢を調整しながら、加工準備点へ向かう。
- iii. 姿勢を保ったまま、次の加工の始点へ向かう。

加工単位パスが終わった段階ではノコ刃がまだワークに切り込んでいる可能性がある。i.とiii.の段階においてノコ刃の姿勢を保ち、半平面上に限定して動くことでワークの他の部分に干渉せずに移動することができる。移動する方向は加工パスを延長した方向(図5左)や加工面上においてパスと直交する方向(図5右)が考えられる。

ii.に関しては、加工の効率化や安全な加工といった観点から様々な方法が考えられるが、今回はZ軸方向に余裕があることから、回転軸(A軸、B軸)がどのように回転しても、ノコ刃がワークに接触しない高さまで移動して、姿勢を調整する方針をとった(図6)。

図5 (左)延長方向への迂回 (右)垂直方向への迂回

図6 安全に姿勢変更を行える高さ

4. 検証

数値制御多軸加工機による建築部材制作を前提とした建築の実現においては次のようなワークフローを想定する。

- 1) アルゴリズムックデザインあるいはプロシージャルデザインのコンセプトのもと、3次元CADとプログラミングの融合により設計を行う。部材分割と部材同士の接続のディテールもこの設計の段階で決定する。

- 2) 部材それぞれの形状から、加工パスコマンド列を生成し加工する。多品種少量生産では加工パスの生成頻度が高いため、このプロセスが十分に合理化されていなければ、この段階が生産全体におけるボトルネックとなってしまう。

- 3) 部材を結合し、建築として構成する。

本研究ではこのワークフローに基づき、できるだけ実建築のスケールに近い形で実施することを試みた。

4.1. カテナリドーム

丸ノコのみで加工できる形状の集合で構成される構造体を考える。建築ではあまり使われないが、簡素な仕口である「留め」を用いた構法を試行する。ただし部材を平面的にのみ構成する構造では、五軸加工機の高い加工能力を示すには不十分である。このことから、製材から切り出した部材を用いて曲面を構成することにした。留めでは曲げモーメント等の伝達について考慮することは困難なため、力学的に素直なカテナリーをベースに成立する構造とした。

4.2. カテナリドームの設計手法

曲面の検討、設計はArchiCAD付属のオブジェクト記述言語であるGDLで行った。加工途中におけるワークの置き換えは誤差発生の主要因であるため、部材に必要な加工を中断することなく完遂することを前提として各部材を設計する。この前提では、五軸加工機の加工範囲の制限を考慮し、各部材の長さのばらつきを抑える設計が望ましい。部材両端部の加工が可能な290mmから300mmの範囲内に部材長が収まるように曲面にグリッドを設定した(図7)。次に部材の上面の両端(以下、始点と終点)をグリッドの点に合わせて配置する。複数の部材が一点に集まる接合部については曲面内の位置によって曲率が異なるため、接合部ごとに部材の進入角度、転び等を考慮して継ぎ手を手作業でモデリングすることは困難である。そこで3次元CAD上で部材の形状と位置関係から嵌合部分を検知し丸ノコで加工可能な仕口を自動生成するプログラムを開発した。

図7 カテナリー曲面にグリッドを設定し(左)、部材を配置する(右)

部材の配置に使用した点と、隣接する部材の側面同士が衝突する交線を含む平面で切断し接合面を生成する。このとき隣接する部材の転びの角度が一定ではないため、稜線が交差することなく段差が生じる場合がある。表面に段差が存在すると見栄えが悪い上、外装材を張る場合でも好ましくない。これに対しては、隣接する両部材の始点と終点を含む平面でさらに切断し、部材上面を山形にすることで段差を解消した(図8)このような鈍角の長い稜線を波打たせることなく一直線になるよう二面加工することは、スライドソーなどの工作機を用いても難しいが、数値制御の多軸加工機では容易に実現することができる。なお、図8右において木口に現れるスリットは、次節で解説するビスケットを用いた納まりによるものである。この部材は切り落とし加工と溝加工のみで実現できるため、前節の加工パス生成ツールを適用することで、全体の加工が導出できる。

図 8 (左)留めによる接合部 (右)丸ノコによる加工に適した部材

4.3. ビスケット納まりと金物の納まり

接合部ごとに異なる形状に対応する補強方法としてビスケット工法を採用した。ビスケット工法とは主に家具における板継ぎや留め加工に用いられ、両材を受けとし間に板状の材を埋め込み接着剤で固定する技法である。一般的に用いられるビスケットは木製であるが、実物大の建築の接合部として採用するには強度不足である。そこで本研究ではカーボンファイバーによって強化した、アルミ並の強度を持つビスケットを 3D プリンタ^{注2)}で出力して用いた。カテナリードームでは用いられるビスケットも多品種少量生産となるが、前節で使用した継ぎ手の形状情報を用いて自動生成した。

木質カテナリードームの仕口のほとんどを従来のビスケット工法(以下 A タイプ)で構成したが、木造建築における金物工法を模した形状(以下 B タイプ)も一部に適用した(図 9)。A タイプは部材の表面に補強材が現れないため美観に優れる一方、構造としてはピン接合となるため、曲げモーメント等を伝達できない。対して、B タイプは曲げモーメント等を伝達できるため、鉄製の金物とボルトによる納まりに将来的に置き換えることで構造的な強度を期待できる。力学的に素直なカテナリーに限定されない多様な曲面形状の実現も、今回の試行と同様なワークフローで実現可能である。

図 9 ビスケット納まり (左: A タイプ 右: B タイプ)

4.4. 施工結果

施工途中での誤差調整処理を持ち込まなかったにもかかわらず、図 10 に示すとおり、美しい留めにより構成されたカテナリードームを集成材により実現することができた。図 10 のメッシュ状ドームに使われている材料は 212 本であり、最大 4 本の重複はあるものの、全体としては 53 種類の部材から構成されている。ビスケット等 3D プリンタにより出力されたコネクタも 30 種類に達する。ドームの規模としては小さいものの、その構成は多品種少量生産と見なせる事例となっている^{注3)}。

新型五軸加工機の開発に伴い加工パス生成段階の合理化を達成したため、これだけのプロジェクトを短時間で完遂することができた。プロシージャルデザインで建築を実現することと多品種少量生産技術とは表裏一体の関係にあるともいえ、今回の新型五軸加工機によ

る集成材カテナリードームの試作は、これからの建築デザインとその実現の方法論として、ひとつの選択肢を示せたと考える。

図 10 施工したドーム

(上: ドーム全体、左下: 納まり A タイプ、右下: 納まり B タイプ)

5. まとめ

本研究は、数値制御の多軸加工機による加工を前提として、建築部材のモデリングから切削まで包括的で一貫性のある理論と技術の構築を目標としている。デザインから生産までシームレスな系は、新しい建築構法の創出に繋がる可能性がある。

前報の五軸加工機から多数の改良を施したが、特に重視したのは加工パス生成段階の合理化であり、これはオペレータにとって理解しやすく使いやすい加工機を構成するために必須の要件であった。オペレータ・フレンドリーなシステムは、五軸加工機のような数値制御による加工機の普及を促進すると考えられる。

検証として制作した集成材カテナリードームは、規模は小さいものの多品種少量生産が可能にする構造体の実例である。力学的に改良した仕口を低コストで実装できれば、多様な曲面構造体を実現可能な構法となり得る。構造研究者とも連携をとり新しい構法としての確立を目指す。

注釈

注1) 著名なイベントである Maker Fair Tokyo 2017 に出展を許され、本加工機による加工の実演を東京ビッグサイトで行った。URL: <http://makezine.jp/event/mft2017/>

注2) The Mark Two

注3) 図 10 における X 字型のドーム脚部は、並行して開発中の六軸ロボット加工機によるものである。これについては稿を改めて報告したい。

参考文献

- 1) 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、pp.447-450、2018.2
- 2) 沖機械株式会社、フンデガーの紹介ページ。(オンライン)、
<http://www.okikikai.com/new/hundegger/sekkei_shien.html>、
(2018-02-06 閲覧)。

[2018 年 2 月 6 日原稿受理 2018 年 4 月 6 日採用決定]