

多軸 CNC を用いた木材加工のための プロシージャルな曲面生成と部材配置検討 Procedural Processes of Curved Surface Generation and Member Placement for Wood Working by Multi-Axis CNC Milling Machine

○田川 直樹^{*1}, 田住 梓^{*1}, 池本 祥子^{*2}, 鷲見 良^{*1}, 河野 哲也^{*2}
Naoki TAGAWA^{*1}, Azusa TAZUMI^{*1}, Shoko IKEMOTO^{*2}, Ryo SUMI^{*1} and Tetsuya KOUNO^{*2}

^{*1} ND3M 学士(工学)

ND3M, B.Eng.

^{*2} ND3M 修士(工学)

ND3M, M.Eng.

キーワード：木造; Houdini; プロシージャルモデリング; データ連携; 曲面表現
Keywords: Wooden structure; Houdini; Procedural modeling; Data linkage; Curved surface.

1. 序

1.1. 背景と目的

近年, 多軸 CNC 加工機や 3D プリンタを用いた造形技術が建築物, 構造物の施工過程に取り入れられるようになってきている。これらの技術を用いることで, 工期の短縮や人員削減などの効率化によるコストの削減や, 造形の自由度を生かした新たな造形の可能性にも期待が寄せられている。特に曲面形状の表現において, 林らの NURBS による 3D モデリングをベースとした設計フローの報告¹⁾などにみられるように, 設計ソフトウェアや CAM 技術の高度化などにより設計した 3D モデルをほぼそのまま再現できるような環境が整いつつある。

これら設計における 3D モデリングには, 数式により正確な面が記述可能な NURBS が用いられることが多い。一方, NURBS 従前に曲面形状の表現で頻繁に用いられていたメッシュモデルは, 頂点の集まりで表現されるため正確な曲面の表現はできず近似的になってしまうため, 建築分野での利用は少ない。しかしながら, 複雑形状を生成する段階においてはボリュームやフィールドの概念の導入など, 各頂点が個別に情報を保持し制御可能であることに由来する処理の単純さなどのハンドリングの良さがあるため, 新たな造形技術と組み合わせた活用が期待される。

そこで本報告では, 自由曲面形状をもつ大型オブジェの設計において, 設計段階に応じて複数のパラメトリックデザインツールを連携させて用いることで, 効率的に複雑なジオメトリを操作する設計手法を提案する。なお, メッシュモデリングによるデザイン検討段階, ツール間のデータ連携, NURBS による部材データ作成段階の 3 つの大枠に分け, 設計フローの構築を行った。

1.2. ケーススタディ

本報告では, 都市公園に設置予定の木造フレームで構成された自由曲面を主とする大型オブジェの設計(以下本プロジェクト)をフロー構築の対象とする(図 1)。この約 4m 四方のオブジェは, A 社^{注1)}の保有する 5 軸 CNC によって制作する木部材の構造体と, 3D プリンタによって出力した樹脂パネルを組み合わせで構成される。本報告では, 特に木造フレームの設計フローに関して論じる。曲面形状の生成では Houdini19.5(以下 Houdini)を用いてモデ



図 1 本プロジェクトで設計するオブジェのイメージ

リングを行い, そのデータをもとに Rhino7(以下 Rhino)および Grasshopper を用いて部材の設計データを作成した。

2. 本報告で用いた技術

2.1. プロシージャルモデリングツールの使用

2.1.1. 本プロジェクトで用いたモデリングツール

本プロジェクトにおける施工モデル作成までのフローでは, 多くのスタディを複数人で検討するためプロシージャルモデリングを用いた。曲面形状を生成するツールとして, Houdini を, 部材設計を行うツールとして, Rhino7 および付随するグラフィカルアルゴリズムエディタである Grasshopper を用いた。

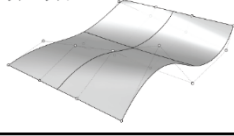
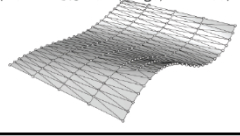
Houdini は, Side Effects Software 社が開発を行うノードベースの 3DCG ソフトウェアで, VFX 分野で広く用いられている。高度なプロシージャルモデリングや物理シミュレーション, パーティクルの処理に優れており, 独自のプログラム言語により高度なアルゴリズムの実装が可能である。建築分野においては, 3D プリンターで出力する G-code の作成や²⁾, 可動域を持つオブジェのモデリング³⁾などで活用されている事例がある。

本プロジェクトで 5 軸 CNC・3D プリンタによる施工技術のポテンシャルを最大限に引き出す複雑形状を生成するにあたり, より高度かつ効率的にメッシュを扱う必要性があった。そこで, メッシュモデリングにおいてはコンピューターグラフィックスの分野で代表的なツールとして知られる Houdini を導入した。一方, 部材設計では, NURBS を用いて正確に曲面をモデリングしていく必要がある。そのため, 建築分野で広く用いられており, 他の構造設計ツールや BIM などとの連携も可能な Grasshopper を用いた。

2.1.2. 各モデリングツールが扱う幾何学的な情報

前述のように、ツールごとに扱いに長けた幾何学的なデータが異なる。本プロジェクトでは幾何学的なデータの特性に応じて設計フローを構築したため、ここでツールのモデリングの特性を比較し整理する（表1）。

表1 Grasshopper と Houdini のデータの扱い方⁴⁾

比較項目	Grasshopper	Houdini
主に扱う3D表現手法	NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)	ポリゴン
曲面の定義方法	2つのNURBS曲線によって生成され、制御点により操作する。	頂点や面の集合であるメッシュによって近似的に曲面を生成する。
幾何要素	制御点(次数, ウェイト), ノットベクトル 	頂点, 辺, 面 (HoudiniではPoint, Edge, Primitive) 
データ構造	データツリーという階層構造に格納され、同じ階層に格納されたデータ(ジオメトリ)ごとに処理を行う。	幾何要素ごとに属性情報(Attribute)が表形式で格納され、表形式で格納されたデータを順次処理する。

2.2.5 軸 CNC による加工

次に、本プロジェクトで用いる工作機械について述べる。5 軸 CNC では、回転傾斜ヘッドが搭載されることにより、XYZ 方向の直線的な加工だけでなく、様々な方向から立体的に切削が可能であるため複雑な曲面の加工が可能である。一方、3 軸加工機と比べ加工に必要な CAM データの作成が複雑になり、データ作成におけるコストが高くなる。また、材料はテーブルに固定されるため、裏面の切削には材料を反転させた切削が必要となる。

3. 設計ワークフロー

5 軸 CNC の加工特性を最大限に生かした複雑曲面形状の 3D モデリングを行うにあたり、複雑形状を生成し、それを効率的に部材データへ繋げていくことが課題となる。本章では、Houdini と Grasshopper を用いた設計フロー（図2）について、それぞれのツールで行った操作、およびツール間のデータ連携について述べる。

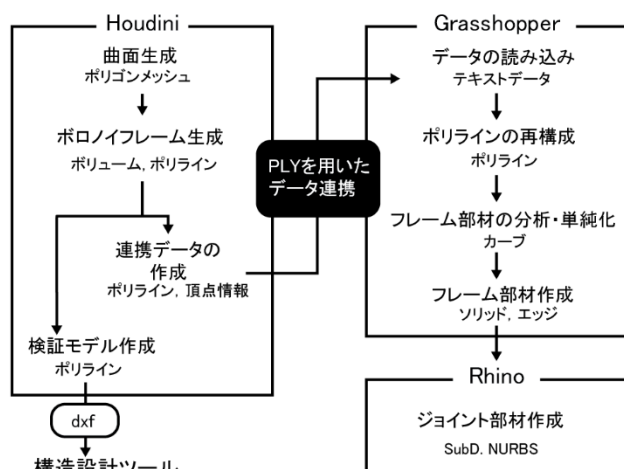


図2 本プロジェクトにおける設計ワークフロー

3.1. Houdini を用いたデザイン検討・形態生成プロセス

Houdini を用いたデザイン検討段階は、全体の形状のベ

ースとなる曲面を生成する「曲面生成パート」、その曲面をもとにボロノイによるフレームを作成する「フレーム生成パート」、構造設計や今後の部材モデリングの参考となるデータを作成する「モデル検証パート」の3つに大別される。

3.1.1. 曲面形状およびボロノイによるフレームの生成

曲面生成パートでは、接地の条件や人体のスケールに合わせたサイズの制約など、使用上求められる設計要件を踏まえて様々な形状の検討が必要となる。

そこで、本プロジェクトでは四角形ポリゴンによって構成された平面上にいくつかの仮想点を配置し、その点と平面の距離に応じて平面が盛り上がるプログラムを作成した。点の位置・平面が盛り上がる度合いの強さを決める係数などをパラメトリックに変更できるようにすることで、様々な曲面をリアルタイムに生成することが可能となっている（図3）。NURBSでは曲面と一致しない制御点の組み合わせにより表現するため、サーフェスの特定の点を拘束する操作は難しい。しかし、各点で情報を保持するポリゴンメッシュでは、点と制御する座標が一致しているため容易に操作が可能となる。

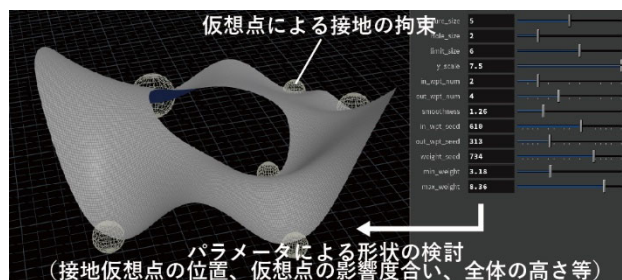


図3 曲面生成パート

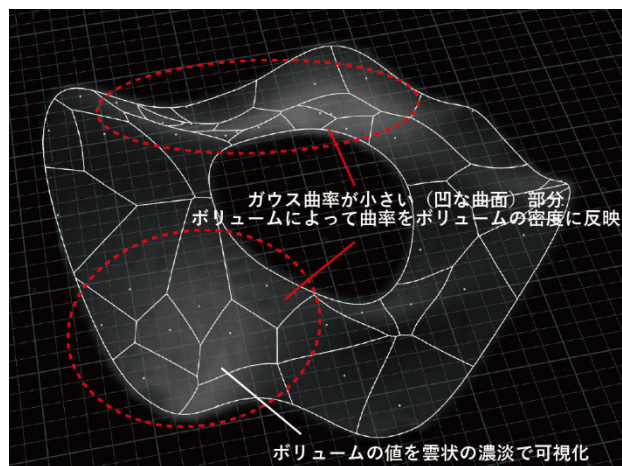


図4 フレーム生成パート

またフレーム生成パートでは、Houdini を用いることでより高いハンドリング性を保ちながら複雑メッシュの操作による形態生成が可能である特徴を活かしてモデリングを行った。本プロジェクトでは、適切に密度をコントロールしたボロノイ形状によって曲面を分割し、輪郭線を抽出してボロノイフレームを生成する。また、このプロセスではボロノイの基準となる点をより直感的に操作するために、ボリュームと呼ばれるボクセルをベースとするモデリング手法を用いた。ボリュームは、画像におけるピクセルと対応する 3D モデルの概念であり、一定の

直方体の範囲に敷き詰められた立方体であるボクセルに値を格納することでモデルを表現する。ボクセルに格納された値を用いることで、幾何的に複雑な曲面のコントロールを3次元的に一括で操作することが可能となる。本プロセスではガウス曲率が小さく下向きにへこんだ部分ほどボロノイ密度が大きくなるプログラムを採用し、パラメータによる密度のコントロールを可能とした(図4)。

曲面、ボロノイフレーム双方のパラメータを変化させることで多様なフレーム形状が数多く効率的に生成され、その中から意匠的に優れたものを選抜した。

3.1.2. 詳細設計に向けた検証・連携モデルの作成

構造設計においては、曲線は分割してポリラインとして解析を行う。そのため、Houdini で生成したポリラインをそのままデータとして用いることが望ましい。しかし、前節で作成したモデルは高密度な四角形ポリゴンメッシュによって曲面を構成したため、ボロノイフレームも曲線を近似した多数のポリラインで構成されている。そのため、モデルのポリラインと構造部材として扱うべきポリラインが対応していない。そこで、対応関係を自動で構築するため、フレーム同士の交点でフレーム全体を分割し、それらの点の間をつなぐポリラインを一本の直線に変換し、構造の解析を行った。

また、曲率や形状の検証を行うため、直線で再構成したフレームに元の曲面の曲率を属性情報として格納し、曲率に応じてフレームの色を変化させ確認を行った。

3.2. ツール間連携

3.2.1. ツール間連携の概要

Grasshopper での部材設計に向け、デザイン検討で用いた Houdini と Grasshopper との連携について述べる。

本プロセスでは、データ連携用のファイル形式として PLY 形式を採用した。PLY 形式はポリゴンメッシュデータや点群データの保存形式として広く用いられており、一つの頂点情報のなかに様々なプロパティを格納することが可能である。PLY 形式を用いることにより Houdini 上で各点に格納されている属性情報およびポリラインを構成する点の情報を Grasshopper に共有することが可能となる。ここでは、Houdini における受け渡しに適したデータの作成手法およびその Grasshopper での読み取りとモデルの再構成手法について詳しく述べる。

3.3.2. Houdini における受け渡しデータの作成

Grasshopper ではデータツリーに格納されたジオメトリごとに処理を行うため、部材ごとに一つのアイテムとしてデータツリーに格納されていることが望ましい。そこで、Houdini ではポリラインの集合であるモデルに部材の情報を持たせるため、各部材を構成する頂点に部材固有の ID を割り振ることで Grasshopper へ共有する情報の作成を行った。

まず、部材ごとの ID を各頂点に割り当てるにあたり、ポリラインなどが連続している部分を判別してクラスタリングし、それぞれ任意の要素に ID を割り振る機能(「Connectivity」ノード)を用いた。3.1.2 項で抽出したフレームの交点を削除することでポリラインのモデルを分割し、その分割した部材ごとに頂点に対し部材と対応した ID を格納することで、頂点と部材の関係を構築することが可能となる。削除した交点に関しても交点を示す ID を付与し、分割された部材と再統合することで、頂点の座標および各部材のポリラインを構成する点の情報を含

む PLY ファイルを得ることができる。

3.3.2. Grasshopper でのデータ読み込みとモデルの再構成

Rhino で PLY ファイルの読み込み自体は可能であるものの、プロパティの読み込みは自由に行うことができない。そこで、Grasshopper を用いて Houdini で作成した PLY ファイルの読み込みを行う。Grasshopper では文字情報としてファイルの内容を読み取る事ができるため、頂点の座標と部材 ID が書き込まれている部分、およびポリラインを構成する点の情報が書き込まれている部分を指定しデータを読み込む。文字情報として読み込まれたデータから点およびポリラインを再構成することで、部材情報を保持したままモデルの受け渡しが可能となる。なお、各頂点と部材 ID の対応関係はデータツリーにおけるリスト番号に基づいて対応付けを行っており、同一の ID を持つ点を抽出することで部材ごとに再構成した(図5)。

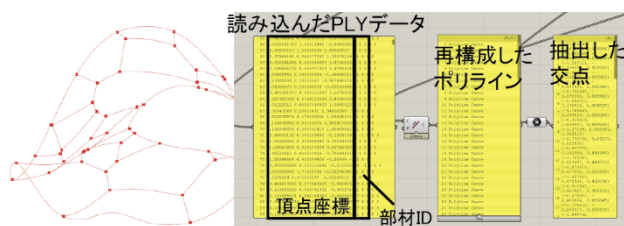


図5 Grasshopper でのポリラインと交点の受け渡し

3.3. 部材形状の生成

Houdini から受け取ったフレームごとのデータを、5 軸 CNC での加工を見据えた設計 3D モデルとするために、Grasshopper と Rhino を併用して部材を作成した。線状の部材と、それをつなぎ合わせるジョイント材に分け、線状部材は単純化し、複数箇所での共通化を試みることで加工の効率化を図った。一方でジョイント材は、それぞれの線状部材の交わる角度が交点ごとに異なるため共通化が難しい。そこで、個別のモデルとして 5 軸 CNC の曲面加工を生かす部材モデルの作成を行った。

3.3.1. 線状部材配置における単純化

線状部材を単純化するにあたり、平面曲線である円弧への近似を行う。3 次元曲線で構成される場合、2.2 節で述べたように両面加工が必要となる。片面加工で統一することで加工数の削減だけでなく、CAM データ作成の単純化にも繋がる。もしくは、より簡便な 3 軸加工機を用いることも可能となる。さらに効率化のため、長さに関しても円弧半径を数種類に統一し、近い長さのものは同じ長さとし、生じた端数をジョイント部材で吸収する設計を行うことで、CAM データにかかる工数をさらに削減することができた。

3.3.2. 線状部材の単純化プロセス

まず、PLY データから再構成したポリラインの拡張点を通る曲線を作成し、その両端をジョイントの寸法分切り取る。次に、その端点を結んだ直線(以下基準曲線)と、曲線との距離を測定し、設定した閾値以下のものについては直線とみなした。閾値以上のものについては、Houdini で生成した基準曲面との交点を持つものを「S 字部材」、それ以外を「円弧近似部材」として分類した(図6)。

S 字部材に関しては、円弧への近似は行わずそれぞれ個別の部材として扱う。S 字部材の曲面との交点における、曲面の法線方向の平面を投影先として平面曲線へ変換す

ることで、片面加工で作業が完結するようにした。

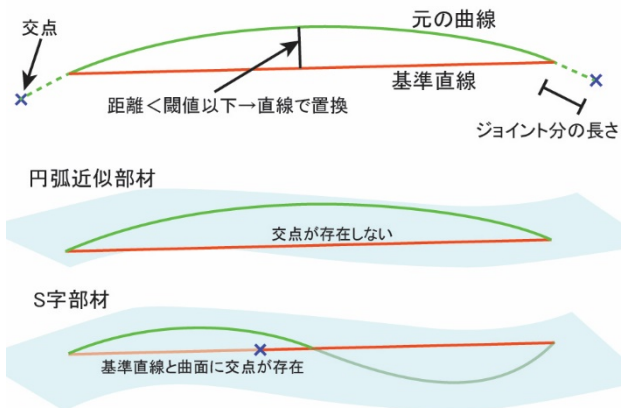


図6 部材種類の判別

円弧近似部材について、各部材を円弧で近似した後、それぞれの曲率半径を比較した。本来の半径より小さい円弧に変更するとジョイント部の形状が凹み、本来の曲面意匠のイメージを損なうという課題がある。そのため、円弧半径をクラスタリングし、それぞれのクラスタのなかで一番大きい半径の円弧に置換を行う(図7)。ただし、本プロジェクトにおいては、各円弧半径の中央付近の半径の1種類に置換しても、美観上の影響は少ないと判断し、最終的に1種類の円弧のみとした。

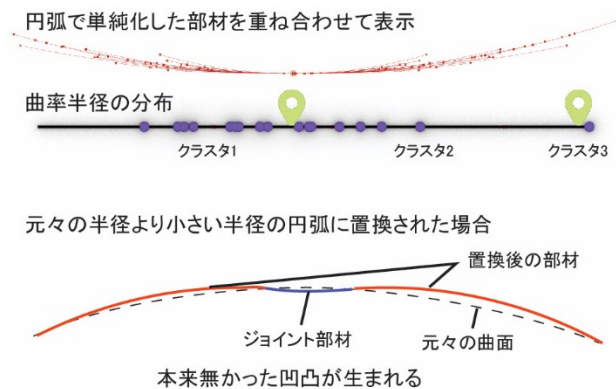


図7 円弧への置換

さらに、近い寸法の部材の同じ長さへの統一や、短い直線部材のジョイント部材への吸収によって、87種類存在した線状部材を、直線部材7種類21本、曲線部材9種類19本、S字部材4種類4本の計20種類44本へと削減することができた。

3.3.3. ジョイント部材のモデリング

線状部材を繋ぐジョイント部材については、Grasshopperでプロシージャルに生成することが難しかったため、RhinoのSubD(サブディビジョンサーフェス)を用いてモデリングを行った。SubDはNURBSに変換可能であるが、UV方向を気にすることなくモデリング可能であり、NURBSのようにサーフェスを切り貼りせずとも複雑な形状を表現できる利点がある。NURBSで問題となる隣接するサーフェスの連続性を考慮せずに造形が可能のため、本プロジェクトで作成するような複数の線状部材が一箇所に集まる形状のモデリングに適している。

一方、SubDを用いることにより、メッシュデータをNURBSになめらかな状態で変換することも可能である。

そのため、再度線状部材のエッジデータをHoudiniに渡し、ポリゴンでモデリングすることも可能であると考えられる。また今回生成した線状部材のエッジは直線のため、接合部はポリゴンでも正確に表現可能である。

4. 結論・展望

4.1. 複数のプロシージャルモデリングツールを組み合わせた設計フロー

本報告では、多軸CNC加工機を用いた木造フレームを持つ大型オブジェの設計において、HoudiniとGrasshopperの2つのプロシージャルモデリングツールの連携に必要なモデル情報およびモデル修正手法を整理した。Houdiniでは各頂点が属性情報として様々な情報を保持できるため、部材IDなどを格納することが可能である。さらに、ポリゴンメッシュの頂点や面の集合であるという特徴を活かし、PLY形式に当てはめてデータを受け渡すことで、頂点や面に紐付けられたデータを保持したままプロシージャルモデリングツール間の連携が可能となった。

本プロジェクトでは部材情報のみ連携を行ったが、この手法によって両端の交点や曲率データ、構造解析結果など様々な情報の連携による発展的なモデリングや検討が期待できる。一方で、Grasshopperでは、属性情報とオブジェクトの対応関係を保持したままデータを扱うこと困難であり、オブジェクトの結合などを行うとデータ構造が変化してしまう。そのため、オブジェクトと情報の対応関係の保持については課題が残る。

4.2. 複雑曲面の意匠性と効率化

ポリゴンメッシュを用いて形状生成を行うことで、NURBSよりも直感的かつ効率的に実施することが可能となった。また、複雑曲面をフレームの分割で表現するにあたり、5軸CNCによる美しい曲面の加工と部材作成の効率化を実現するため、単純化された線状部材と複雑なジョイント部材に分けてモデリングを行った。

さらに、プロシージャルモデリングにより様々なパターンの比較検討を行うことで、意匠性を保った部材の単純化や削減を実現することができた。以上のように、本報告で提案する設計フローによって複雑平面のモデリング・加工の両方における効率化が達成された。

注1) 愛知県に拠点を置く特注家具製造会社(従業員40名)。木工造作家具製造が主たる業務であるが、5軸CNC加工技術を活かした製品開発事業も展開している。

【参考文献】

- 1) 林 盛, 山崎 康造, 木村 俊明, 榎藤 智之: NURBS 曲面モデルを用いた鉄筋コンクリート造の自由曲面屋根の施工プロセスと合理化, 日本建築学会技術報告集, 25 巻, 60 号, pp.935-940, 2019, DOI: <https://doi.org/10.3130/aijt.25.935>,
- 2) 江口 莊哉, 大平 麻以, 岡部 紅有, 木下 里奈, 田中 浩也: MEX-3DP のためのプロシージャルなツールパス編集ツールの開発, Confer4D and Functional Fabrication 2022 予稿集, pp.71-74, 2022
- 3) Ohira, Mai, Soya Eguchi, Claire Okabe, and Hiroya Tanaka: Demonstrating Ex-CHOCHIN: Shape/Texture-Changing Cylindrical Interface with Deformable Origami Tessellation., In Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 1-3. UIST '22 Adjunct 57, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1145/3526114.3558626>
- 4) H. Pottmann, A. Asperl, M. Hofer and A. Kilian: Architectural Geometry. Bentley Institute Press, 2007