

# ポリゴンモデリング技法を 3D プリント用ツールパス表現に直接変換する ソフトウェアの開発

## Converting Polygon Modeling Techniques Directly into Toolpath Representation for 3D Printing Software Development

知念 司泰<sup>1</sup>, 松岡 康友<sup>2</sup>, 田中 浩也<sup>1</sup>

Moriyasu Chinen<sup>1</sup>, Yasutomo Matsuoka<sup>2</sup>, Hiroya Tanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>慶應義塾大学 環境情報学部, <sup>2</sup>慶應義塾大学 政策・メディア研究科

<sup>1</sup> Faculty of Environment and Information Studies, Keio University,

<sup>2</sup> Faculty of Media and Governance, Keio University

### 【要約】

本研究ではポリゴンモデリングをベースとした非平面3D プリント手法を提案する。一般的なMaterial Extrusion式3D プリント用スライサーでは、3D モデルを平面スライスすることでツールパスを生成するため、一様な異方性と積層痕が生まれ、形状によって造形品質及び強度の悪化に繋がりがやすい欠点を持つ。対して非平面スライスは3D モデルの輪郭や任意の異方性に沿ってスライスを行うため、造形品質及び強度の向上が見込める点で注目されている。そこで本研究では有機的な曲面形状の生成に長けたポリゴンモデリング技法をベースとした非平面スライスソフトウェアを開発し、サンプル製作とその応用可能性について考察した。

キーワード: 非平面3D プリント, ポリゴンモデリング, スライサー, Gcode, MEX

### 【Abstract】

This study proposes a non-planar 3D printing method based on polygon modeling. It is based on a general Material Extrusion In general 3D printing slicers, toolpaths are generated by slicing a 3D model into planar slices, which results in uniform anisotropy and stacking traces, and has the disadvantage that it easily leads to deterioration of build quality and strength depending on the shape. In contrast, non-planar slicing is a method that slices along the contours and arbitrary anisotropy of the 3D model, and has attracted attention for its potential to improve modeling quality and strength. In this study, we developed a non-planar slicing software based on a polygonal modeling method that excels in generating organic shapes, fabricated samples, and discussed their potential applications.

Keywords: non-planar 3D printing, polygon modeling, slicer, Gcode, MEX

### 1.序論

近年、大型化が比較的容易で環境負荷を抑えられる観点から Material Extrusion 式の 3D プリント(以下 MEX3DP)が注目されている。MEX3DP で一般的に用いられる平面スライス方式では、3D モデルを平面でスライスした断面をもとにノズルを動かし、材料を高さ方向に積み上げることで3Dプリントを行う。そのため形状に関わらず、地面に対し水平な積層痕が生じる。この積層痕は形状によって造形品質と強度の悪化につながる。レイヤーピッチの高さに比例してこの影響は大きくなるため、特に家具～建築スケールの MEX3DP で審美性を備えたものを作るには造形上の制約が非常に大きい。そこでMEX3DPで綺麗に造形できる形状を拡張する非平面スライス方式が注目されている。この方式では3D モデルの輪郭に沿ってツールパス生成を行うため(図1)、造形品質及び強度の向上が見込める。

非平面ツールパスの生成には 3D モデルを解析し自動でツールパスを生成する事例[1,2]やツールパス自体をモデリングする事例[3,4]などが存在する。後者の中では様々なモデリング技法が見受けられ、技法ごとに得意とする形状に差異がある。本研究では新たにポリゴンモデリングをベースとしたソフトウェアを開発した。ポリゴンモデリングは 3DCG 制作などに用いられ(図2)、手作業で有機的な曲面形状の生成を行うことに長けているため、3D プリントの特性を生かした多様な形状生成を容易にすることが期待できる。



図1. 左:平面3DP, 右:非平面3DP

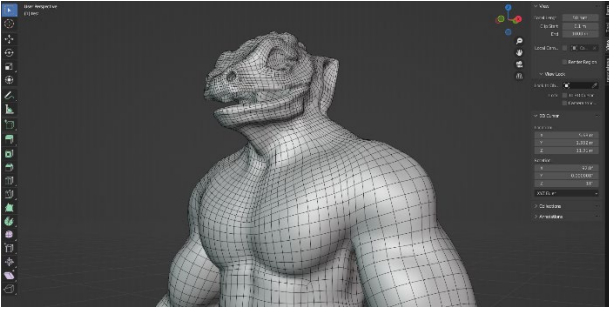


図2. ポリゴンモデリングの例

## 2.関連事例

自動でツールパスを生成する事例としては Ai Build[1]や Print Path Key-framing[2]などが挙げられる。設計段階でツールパスの流れを考慮する必要がないため形状生成が容易であるが、一方でツールパスの流れを細かく制御することができない。対して手動で生成する事例では形状とツールパスを同時にモデリングすることで詳細な積層痕のデザインが可能である。そのため、モデリング技法によって作りやすい形状に違いが生まれる。例えば[3]は NURBS モデリング技法を用いており、NURBS モデリングの特徴である数理的で滑らかな曲面の生成に長けている。Nozzle Boss[4]はスカルプトモデリング技法を用いることで粘土をこねるような有機的な形状生成に長けている。本研究では新たにポリゴンモデリング技法を用いている点において他の事例と異なる。

## 3.ワークフロー

本研究では任意の 3DCAD, 3DCG ソフトで作成したメッシュデータから GUI 操作のみで Gcode に変換するソフトウェアを Rhinoceros[5]のプラグインとして開発した。具体的なワークフローは以下の5ステップとなる。(図3)

### 1.モデリング

ポリゴンモデリング

### 2.エッジ抽出

メッシュの横線を非平面ツールパスとして抽出

### 3.レイヤー補完

レイヤーピッチに応じて横線を補完

### 4.ツールパス編集

テクスチャ、インフィル構造の付与

### 5.書き出し

線を GCODE へ変換

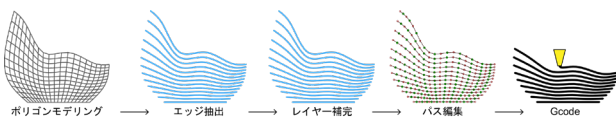


図3. ワークフロー

## 4.モデリング

ポリゴンモデリングソフトには、手作業で複雑な形状をモデリングするための機能が備わっている。ここでは多くのソフトに備わる普遍的な機能を紹介する。

### 4.1 サブディビジョンサーフェス

サブディビジョンサーフェスはポリゴンメッシュを規則的に分割することで、粗いポリゴンをなめらかに細分化する機能である。この機能によって、少ない制御点操作で有機形状を作ることができる。(図4)では2080個の頂点を80個の制御点で操作している。

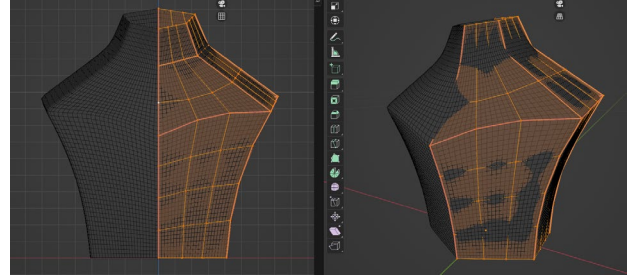


図4. サブディビジョンサーフェス

### 4.2 クリーズ

クリーズを使うことでサブディビジョンサーフェスの任意のポリゴンエッジを角ばらせることができる。これによって(図5)のようにサブディビジョンサーフェスの恩恵を受けながら、柔らかな曲面形状のみならず、エッジのあるシャープな形状のモデリングも可能となる。

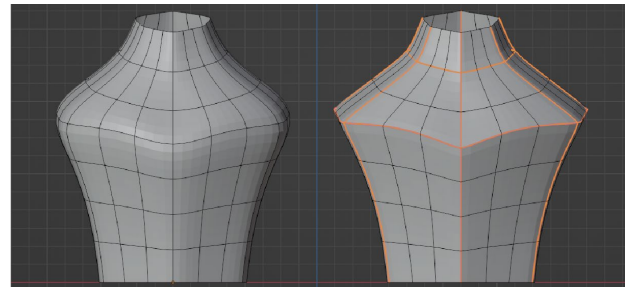


図5. 左:クリーズあり 右:クリーズなし

### 4.3 データ制作上の制約

本手法ではポリゴンモデリングによって生成したメッシュの横線に基づいてツールパスを生成する。そのためポリゴンモデルには以下の制約が生じる。

- ・クワッドメッシュのみで構成されていること
  - ・横線の傾きが最大傾斜角以下であること
  - ・機械とモデルが衝突しない形状であること
- それぞれについて以下に詳述する。

#### 4.3.1 クワッドメッシュのみで構成されていること

頂点数が4点で構成されるクワッドメッシュ以外が混在すると(図6)のように横線抽出工程が破綻してしまう。

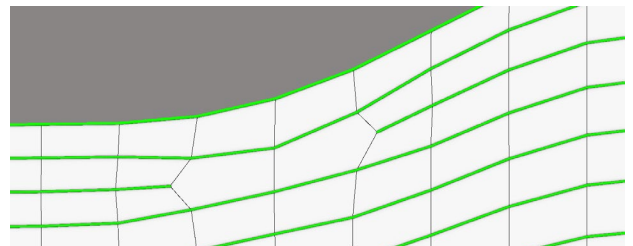


図6. クワッドメッシュ以外が混在した様子

#### 4.3.2 横線の傾きが最大傾斜角以下であること

一般的な3軸3Dプリンタで非平面3Dプリントを行う場合、造形物がノズルに対して斜めに接するため、その傾斜角を考慮したデータを設計する必要がある。傾斜角が大きくなり、最大傾斜角を超えると造形に荒れが発生する(図7, 8)。最大傾斜角はノズル径、材料、温度、造形速度などに左右されるが、25~40°の範囲内となることが多い。

一方ロボットアームなどの5軸3Dプリンタは造形物に対してノズルが垂直に接するように傾けることができるため、傾斜角の制限を受けずに造形することが可能である(図9)。

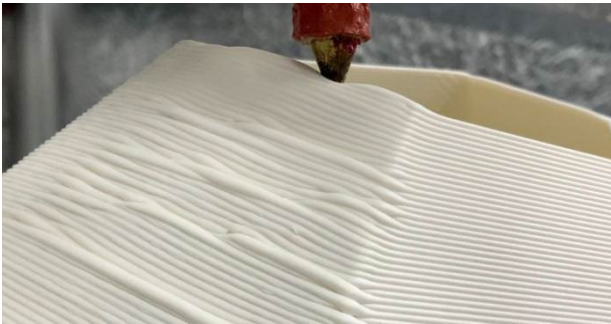


図7. 造形荒れが生じている様子

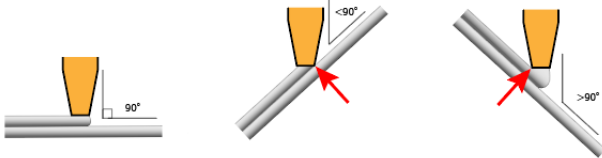


図8. 3軸3Dプリンタで非平面造形をした場合

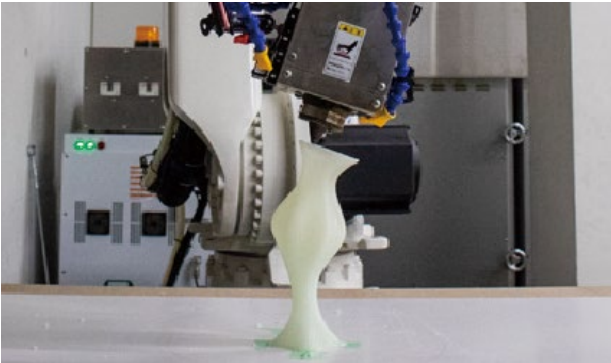


図9. ロボットアーム3Dプリンタを使った5軸造形の様子

#### 4.3.3 機械とモデルが衝突しない形状であること

非平面3Dプリントを行う際、図10のように造形物と機械が衝突しない形状を設計する必要がある。



図10. 機械との衝突例

#### 5.エッジ抽出

ポリゴンの横線のみを抽出する。

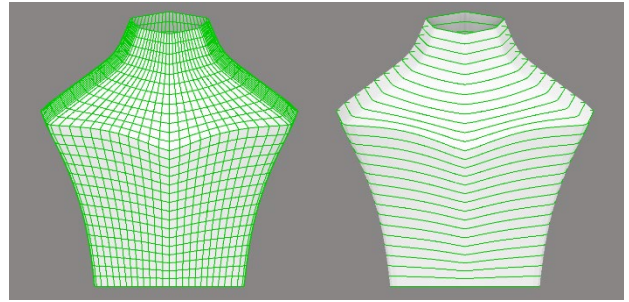


図11. 左:抽出前 右:抽出後

#### 6.レイヤー補間

最大のレイヤーピッチを指定し、そのレイヤーピッチ以内に収まるようにツールパスを補間する。

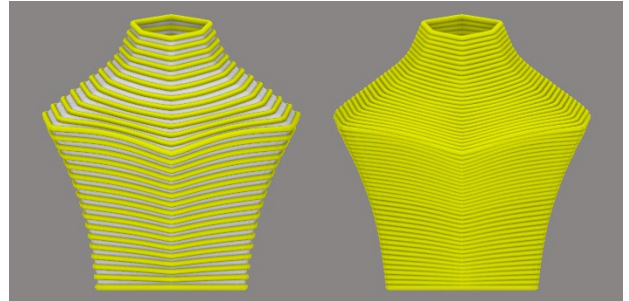


図12. 左:補間前 右:補間後

#### 7.ツールパス編集

手動では難しいテクスチャ付与や、インフィル生成を行う。頂点の位置を法線方向に一樣に移動することで、網目のようなテクスチャを均一に付与することが可能となる。

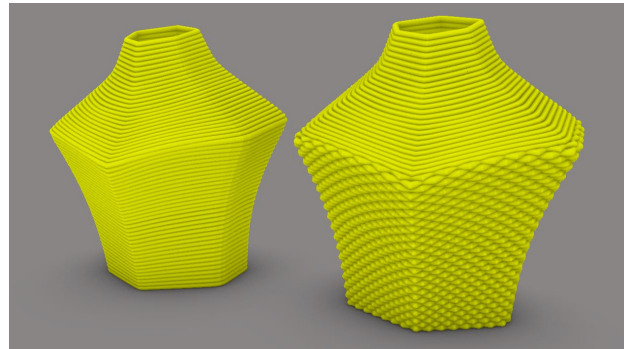


図13. 左:編集前 右:編集後

#### 8.書き出し

造形速度等の設定を行い、Gcodeを書き出す。

#### 9.サンプル製作

開発したソフトウェアを用いてポリゴンモデリング技法特有の形状を持つサンプルを制作した。ポリゴンモデリング技法は有機的な形状に加え、キャラクターモデルの胴体と腕(図2)のようにメッシュが枝分かれする分岐構造を得意とする。そこでそれらを組み込んだサンプルを



3DCGソフトBlender[6]でモデリングし、スライスを行った。造形の際は枝の付け根にあるメッシュエッジでパーツを四分割し、更にモデル全体が非平面レイヤーであるためサポート材となるベッド上で造形を行った(図14)。

結果として平面レイヤーでスライスした場合と比較すると、枝の付け根の積層が途中で途切れることなく接続しており、より美しい積層痕を持つ造形となった(図15, 16)。また枝分かれ構造の造形はツールパスを自動生成する事例に見られるが[2], 手動生成によってより木の枝の分岐構造に分割が可能となった。

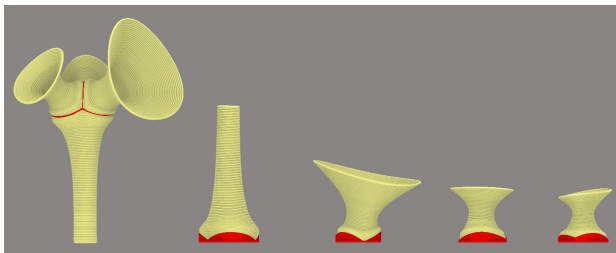


図14. Gcode のプレビュー



図15. 造形されたサンプル



図16. 左:平面スライス 右:非平面スライス

## 10.結論

本研究では、ポリゴンモデリング技法で非平面3D プリント用 Gcode を作成するソフトウェアの開発とサンプル製作を行い、ポリゴンモデリング技法の有機かつ多様な形状生成を得意とする機能が非平面3D プリントへ応用できることを示すことができた。

本手法はポリゴンモデリングスキルを持つ人であれば参入障壁が低い点、家具～建築スケール MEX3DP で多様な形状が作れる点で、3DP のさらなる社会実装や産業応用を設計の側面から後押しすることが期待できる。

実際の応用例としては防災行政無線などが考えられる。枝分かれ構造を拡声器として応用することで、全方位スピーカーを造形できる。有機的な造形を付与することで、従来よりも自由度を高め、都市の音環境をよりよく調整できるようになる。さらには、遊具や街灯、彫刻等の屋外構造物と複合することで街に新たな機能や魅力をもたらすことが期待できる。今後はこうした応用を実践しつつ、ポリゴンモデリングスキルを持つポリゴンモデラーやデジタル造形師への  $\beta$  テストを実施することでソフトウェアの改良、並びに本手法ならではの造形を明らかにする。



応用例

## 参考文献

1. Ai Sync <https://ai-build.com/>  
(参照 2022-09-22)
2. Mitropoulou, Ioanna & Bernhard, Mathias & Dillenburger, Benjamin. Print Paths Key-framing Design for non-planar layered robotic FDM printing. 10.1145/3424630.3425408. 2020.
3. ADVANCED 3D PRINTING WITH GRASSHOPPER <https://www.food4rhino.com/en/resource/advanced-3d-printing-grasshopper-clay-and-fdm>  
(参照 2022-09-22)
4. nozzle boss <https://github.com/Heinz-Loepmeier/nozzleboss>  
(参照 2022-09-22)
5. Rhinoceros <https://www.rhino3d.com/>  
(参照 2022-09-22)
6. Blender <https://www.blender.org/>  
(参照 2022-09-22)