

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

Development of the Procedural Toolpath Editing Tool for MEX-3DP

江口 壮哉¹, 大平 麻以², 岡部 紅有², 木下 里奈¹, 田中浩也²

Soya EGUCHI¹, Mai OHIRA², Claire OKABE², Rina KINOSHITA¹, Hiroya TANAKA²

¹慶應義塾大学大学院, ²慶應義塾大学

¹ Keio University Graduate School, ²Keio University

【要約】

材料押し出し方式の 3D プリンタは Gcode によって造形が行われるため、特殊な Gcode を工夫して設計することでさまざまな意匠や機能を作り出すことができる。本研究ではアニメーション制作用の CG ソフト上にプロシージャルなスライサーを構築することで、既存研究とは異なる特徴を持つツールの開発を図った。具体的には、物理シミュレーションを用いた Auxetic Pattern の生成ツールの開発とアニメーションを付加した積層モデルのレンダリングを行った。実装元の CG ソフトの機能を活かして、既存の Gcode 設計プロセスの前後の可能性を拡張した。

キーワード: プロシージャル, スライサー, Gcode, MEX, レンダリング

【Abstract】

Material extrusion 3D printers allow various designs and functions to be generated by designing special Gcode with original software. In this study, we developed a procedural slicer on CG software used for animation production. Thus, the tool has different characteristics from related works. Specifically, we created a software tool to generate the Auxetic Pattern using physics simulation and rendered an animated 3d-printed-like model. We extended the possibilities of Gcode creation before and after the design process by using the functionality of the CG software.

Keywords: Procedural, slicer, Gcode, MEX, rendering

1. 序論

樹脂材料を用いる FFF(Fused Filament Fabrication) や FGF(Fused Granular Fabrication)をはじめとし、材料押し出し方式(MEX : Material Extrusion)の 3D プリンタを用いた最終製品の製造は広く普及し始めている。樹脂を用いた小屋[1]や椅子[2], プロダクトスケールのアート作品[3]なども販売されるようになってきた。MEX は 3D プリンタを動かすための座標の羅列であるツールパス, すなわち Gcode によって造形が行われるため、Gcode を工夫して設計することでさまざまな意匠や機能を作り出すことができる。特殊な Gcode の設計には既存のスライサーソフトではなく、専用のツールが用いられることが多い。専用ツールには独自のプラットフォーム上で実装している事例[4,5]や、特定の CAD ソフト上で実装している事例[6,7]などが存在する。特定の CAD ソフト上で実装を行うと、プラットフォームとなった CAD ソフトの特徴が反映されるため、Gcode の設計においても異なる特徴を持つようになる。

我々は Gcode の読み書きなどの編集ツールをアニメーションや VFX のための CG ソフトである Houdini[11]上で実装することによって、新たな特徴を持つ Gcode 編集ツールが作れないかと考えた。Houdini のようなプロシージャルモデリングソフトを用いて Gcode 設計プロセスの細分化を行うことで、データの入出力のタイミングを自由に設けることも可能となると考えた。さらに、時間経過を利用した物理シミュレーションや、アニメーションの追加と PBR(Physical Based Rendering)などの Houdini が得

意とする機能と組み合わせることによって、3D プリントのための Gcode 設計プロセスのアップデートを図る。

2. 関連研究

一般的に 3D プリントを行う際にはスライサーと呼ばれるソフトウェアに 3D モデルを読み込ませ、Gcode を書き出す(図 1a)。既存のスライサーでは不可能な、特殊な Gcode を取り扱うソフトウェアにも、さまざまなものが存在する[4-7]。一般的には MEX のための特定の意匠や機能を達成するために自作でツールを制作して取り扱う場合が多い。Ai Build[4]はロボットアームを用いてノズルのアプローチ角度を制御することで可能になる構造体を設計可能なツールを販売している。FullControl GCode Designer [5]は卓上の 3D プリンタで実験可能な特殊な造形手法とその形をパラメトリックに変更可能なツールを公開している。このような独立したプラットフォームを用いたオリジナルのツールでは、達成したい造形手法が明確にあり、それを可能にする Gcode を書き出し可能な機能を提供している(図 1b)。一方で、既存の CAD ソフトに実装することで、使用者自身が達成したい造形を自由に組み立てる事例も存在する。Fabrix[6]は Illustrator 上の線データを Gcode として書き出し可能なプラグインを提供している。このツールはグラフィックデザイナーのような 3D 造形に詳しくない人が 3D プリントする物をデザインする場合の障壁を低くしている。Rhinoceros の Grasshopper[12]上でのツールの実装[7]は、ノードベースのプロシージャルな設計方法を活かし

て、より自由度の高い Gcode の設計を可能としている。

本研究では、Houdini 上にツールを実装することで、プロセス的に Gcode の設計が行えるため、設計の自由度を高めるといって Grasshopper と似たコンセプトを持つが、Houdini が持つ物理シミュレーションやアニメーションに使われる機能を活用して Gcode 設計の手法や活用方法を開拓する点が異なっている(図 1c)。

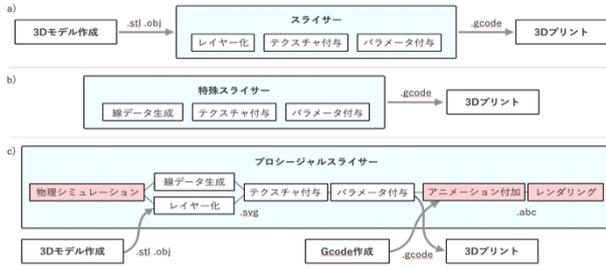


図 1. a)一般的なスライサーのワークフロー. b)MEX の特殊な造形を可能にする Gcode 設計ツールのワークフロー. c)本研究におけるプロシージャルスライサーのワークフロー

3. ツールの実装

3.1 Houdini の特徴

Houdini での Gcode 編集における特徴を考える。Grasshopper と同様にプロシージャルなソフトウェアなので、スライスの処理が細分化されている。そのため、ブロックごとの処理の組み替えや他の CAD ソフトで設計したデータの入出力などを容易に行うことができる。

Houdini のアトリビュートの概念と Gcode 編集との相性も考えたい。アトリビュートとは点などに複数の属性(情報)を持たせられる機能である。Gcode の中身は、座標を表す XYZ と、材料の吐出量を表す E, 移動速度を表す F, その他の M コードなどで構成されているため(図 2), 点の位置に加えて吐出量の乗数や移動速度の乗数をアトリビュートとして格納しておくことで Gcode の値の管理がしやすくなる(図 3)。

```

7 ;Main Script
8 G92 E0
9 G1 X97.243 Y78.172 Z0.200 F3600
10 G1 X92.458 Y79.343 Z0.200 E0.205 F2400.0
11 G1 X88.048 Y81.535 Z0.200 E0.410 F2400.0
12 G1 X84.241 Y84.660 Z0.200 E0.614 F2400.0
13 G1 X81.223 Y88.551 Z0.200 E0.819 F2400.0
14 G1 X79.143 Y93.016 Z0.200 E1.024 F2400.0
15 G1 X78.117 Y97.832 Z0.200 E1.229 F2400.0
16 G1 X78.172 Y102.757 Z0.200 E1.433 F2400.0
    
```

図 2. Gcode の内部の記述例

Node: edit_...	P[x]	P[y]	P[z]	ExtrusionMultiplier	FeedMultiplier
0	19.0	0.0	0.2	1.0	1.0
1	19.9015	1.25148	0.2	1.0	1.0
2	18.8129	2.3778	0.2	1.0	1.0
3	19.6072	3.73902	0.2	1.0	1.0
4	18.3485	4.7117	0.2	1.0	1.0
5	19.0211	6.18034	0.2	1.0	1.0
6	17.6137	6.97312	0.2	1.0	1.0
7	18.0603	8.49992	0.2	1.0	1.0
8	16.6176	9.13424	0.2	1.0	1.0
9	16.8363	10.6853	0.2	1.0	1.0
10	15.3713	11.1679	0.2	1.0	1.0

図 3. Houdini のアトリビュートの記述例

3.2 実装したツール

実装したツールを図 4 に示す。ツールは主に 3D モデルまたは線データのモデリングパート, Gcode の書き出しパート, Gcode の読み込みパート, Gcode のレンダリングパートに分けられる。

モデリングパートでは、通常のスライサーのように 3D モデルからレイヤー分けされた線を作る機能や、パスを波打たせることによるテキストチャ付与などのいくつかのアセットを制作した(図 4a)。制作したアセットでは、パラメータを変えることによって様々なテキストチャを作り出せる。Gcode の書き出しパートでは、格納されたアトリビュートの情報やノズル径などのマシンの情報を利用して Gcode を生成している(図 4b)。Gcode の読み込みパートでは、Gcode のテキスト情報から座標と吐出量, 移動速度を抽出し、各点のアトリビュートに格納する機能を備えている。格納された情報を元に色分けなどを行うこともできる。レンダリングパートでは吐出量からパスの太さを計算し、積層痕などのテキストチャを反映することで 3D プリントされた際にどのような見た目になるのかを確認することができる(図 4c)。

実装したツールはブロックごとに入力となるデータ形式と、出力となるデータ形式が決まっており、そのフォーマットに合わせたデータであれば外部のソフトウェアで設計されたデータを用いることも可能である。

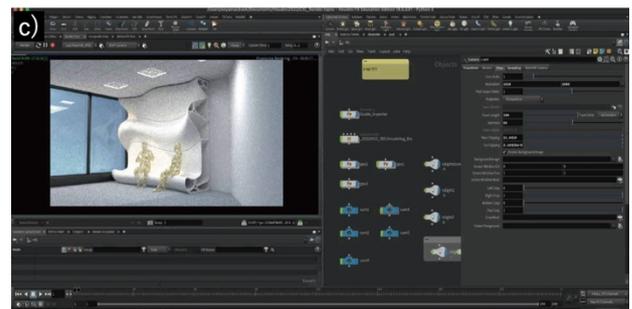
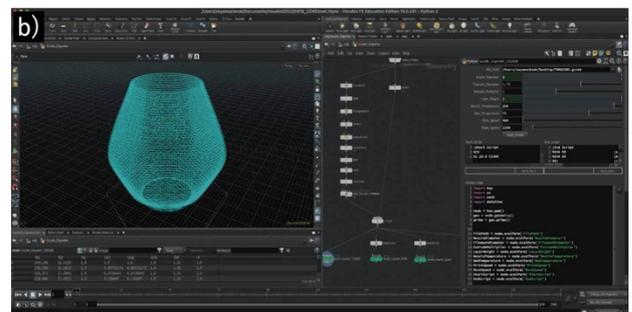
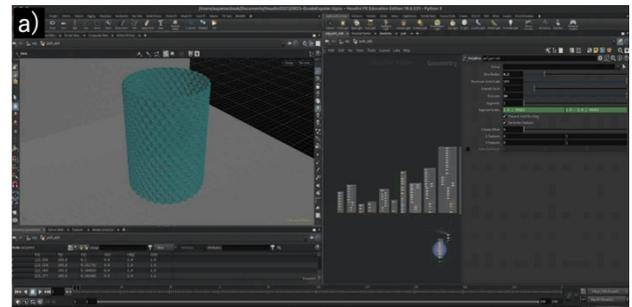


図 4. Houdini 上で実装したツール

4. アプリケーション

4.1 Pneumatic Auxetics



図 5. 物理シミュレーションを利用した 3D プリントフロー

空気を抜くことで任意の起伏を作り出す研究[8]のためのツールを制作した。外側の TPU フィルムを用いた膜と内側の TPE を 3D プリントした内部構造で構成されており、空気を抜くことで内部構造の形状に応じて変形する手法研究である。Houdini を用いたツールでは、Gcode 生成プロセスに加えて、物理シミュレーションを用いた Auxetic Pattern の形状最適化のプロセスを組み込んでいる(図 5)。実際に制作したツールを図 6 に示す。ターゲットの起伏の形状から、三角形のパターンの大きさを変化させ、厚みと勾配を持つ Auxetic Pattern の逆設計を行うことで、内部構造を設計した。インプットの形状を変えることで異なる起伏を作り出すこともできる(図 7)。3D プリントした内部構造は三角形のパターン部分は硬く、それらをつなぐヒンジ部分は柔らかい必要がある。三角形の大きさを変えるシミュレーションを行った後にヒンジ部分を柔らかく保つための 3D プリントデータの生成も行った。

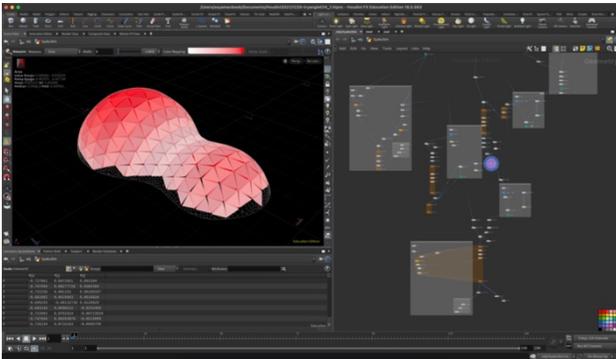


図 6. 形状最適化ツール

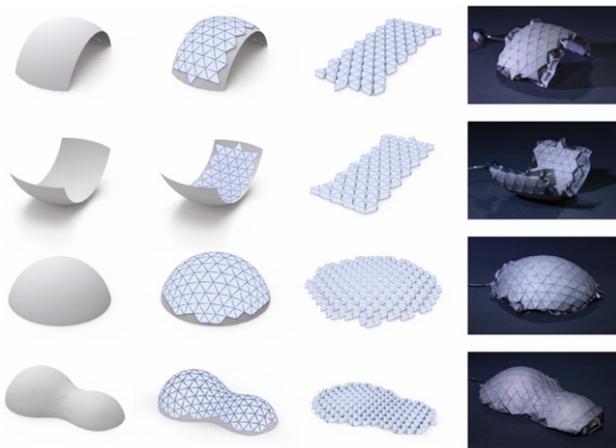


図 7. 異なる形状をターゲットとするサンプル

4.2 レンダリング表現



図 8. 外部で作成した Gcode を読み込むレンダリングフロー

外部で作成した Gcode ファイルを読み込み、レンダリングを行うワークフロー(図 8)について紹介する。オリジナルのツールで Gcode ファイルを読み込むことで、ツールパスの座標と吐出量、移動速度を取得することができる。その後、ツールパスの移動量と樹脂の吐出量から 3D プリントした際のパスの太さを計算することで、吐出の増減に対応しながら積層痕を持つ見た目を再現することができる。

さらに積層痕をつけたツールパスをレンダリングすることによって、実際の 3D プリントを行わずに造形した際の見た目を確認することができる。読み込んだモデルにアニメーションを追加することによって本来 3D プリントでは造形できない形を作ることもできる。既存の積層痕をモデルとして取り出す試み[9,10]とは表現の方向性が異なっている。

図 10 は多色 3D プリントによって造形された花瓶の写真である。今回はこの花瓶を造形する際に使用した Gcode を用いて 2 つのアニメーションの PBR を制作した。図 11 は積層痕を持つモデルを生成し、モデルに対して波のシミュレーションをしたレンダリングである。3D プリントしたものに水をかけた際の印象的な動きを切り取ることができた。図 12 はモデルを 4 つに複製してアニメーションを加えたレンダリングである。モデルの干渉を考慮する必要がないため、実際には 3D プリントはできないモデルの重なりによる模様見え方の変化も作ることができた。

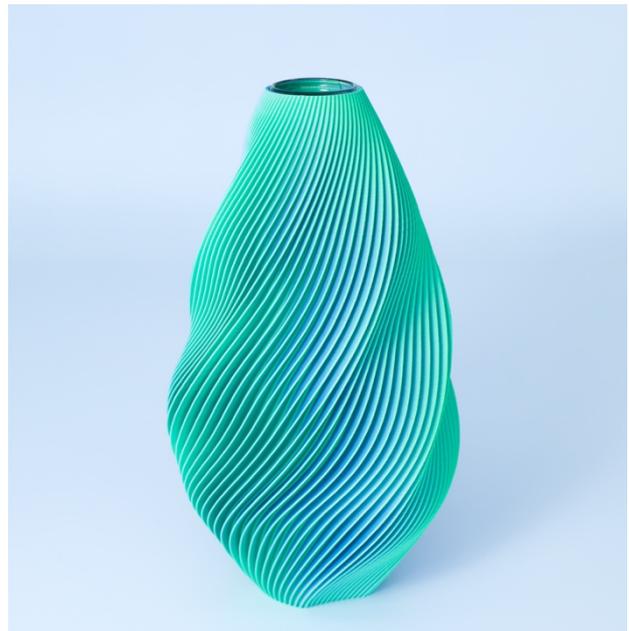


図 10. Gcode から実際に 3D プリントされたモデル

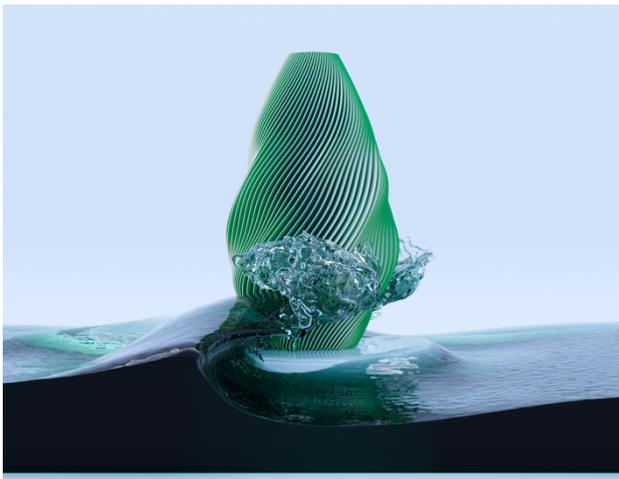


図 11. 生成したモデルを用いた水のシミュレーション



図 12. 4つのモデルを重ね合わせた表現

5. 結論

Houdini を用いて、Gcode の基本的な編集ツールの開発と、モデル生成における Auxetic Pattern の設計ツールの制作、Gcode の読み込みとツールパスにアニメーションを加えることによるレンダリング表現を行った。ツールはプロシージャルにスライスの機能をつなげることで実装しているため、処理の途中のデータを Gcode 以外の形式で書き出すことができた。3D モデル以外の Gcode など途中から挿入することができるため、他のソフトウェアとのデータのやりとりが可能になった。

Auxetic Pattern のシミュレータとモデル作成は物理シミュレーションを用いた形状の最適化とそのシミュレーション結果から 3D プリントのためにデータを最適化までを一貫して行った。レンダリングでは、読み込んだ Gcode にアニメーションを加えることによって 3D プリントでは再現できない形状や環境を構築した。これは 3D プリントする以外の Gcode の新たな活用方法と言えるだろう。Gcode の価値は 3D プリントを行うのみではなく、データ自体の美しさや CG 素材としての価値も内在していると考えられる。

現在は、制作したツールを自身のプロジェクトに用いているため、Houdini の機能を活用するための用途で実装を行っている。しかし、実装するプラットフォームの違いによるユーザー層の変化による用途の変化については検証がなされていない。今後、ツールを公開し、広く Houdini ユーザーに使用してもらうことで、既存のライターとの違いがより明確になると考える。

参考文献

1. DUS. URBAN CABIN. <https://houseofdus.com/#project-urban-cabin>. (参照 2022-09-19)
2. 益山 詠夢, 大木 智博, 田中 浩也. 再生プラスチック材料を用いた 3D プリント椅子・ベンチの設計と製造実証. Conference on 4D and Functional Fabrication 2021(4DF2021). OP-02. 2021.
3. Sekisai. 遊色瓶. <https://sekisai.com/PlayfulColorVase>. (参照 2022-09-19)
4. Ai-Build. AiSync. <https://ai-build.com>. (参照 2022-09-19)
5. Andrw Gleadall. FullControl GCode Designer: Open-source software for unconstrained design in additive manufacturing. Additive Manufacturing, Volume 46. 2021.
6. Fabrix. <https://www.fabrix.design>. (参照 2022-09-19)
7. Diego Garcia Cuevas, Gianluca Pugliese. Advanced 3D Printing with Grasshopper®: Clay and FDM. Independently published. 2020.
8. Soya Eguchi, Claire Okabe, Mai Ohira, and Hiruya Tanaka. Pneumatic Auxetics: Inverse design and 3D printing of auxetic pattern for pneumatic morphing. In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 435, 1-7. 2022.
9. PURUSA Research. Export toolpaths as OBJ. <https://help.prusa3d.com/article/export-toolpaths-as-obj1777>. (参照 2022-09-19)
10. GitHub. Blender-Gcode-Import. <https://github.com/Heinz-Loepmeier/Blender-Gcode-Import>. (参照 2022-09-19) <https://www.sidefx.com/products/houdini/>
11. SideFX. Houdini. <https://www.sidefx.com/products/houdini/>. (参照 2022-09-19)
12. Rhinoceros. Grasshopper. <https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper/>. (参照 2022-09-19)