

光造形方式 3D プリントのための映像編集技法を用いた 立体形状デザイン手法の提案

岡田直観^{†1} 宮下芳明^{†1}

概要：本稿では、スライスアニメーションを制作・編集し光造形方式 3D プリンタを用いて出力するためのパイプラインシステムを構築し、これを用いたワークフローを検討する。提案システムではモデリングプロセスを経ずに、スライス画像の連番をアニメーション制作ツールで作成し、直接 3D プリンタに送信する。また、ユーザは画像処理技術やキーフレームアニメーションなどの映像編集技法によって、立体形状をデザインできる。造形実験と作例分析の結果、従来のモデリングでは作成が困難である、複雑な内部形状を持った造形物が得られた。特にジェネラティブアートのような抽象的な形状を作成する際に有用であるといえる。

Three-Dimensional Shape Design for Stereolithography 3D Printing Using Image Editing Technique

NAOMI OKADA^{†1} HOMEI MIYASHITA^{†1}

Abstract: In this paper, we propose a pipeline system for producing, editing and 3D slicing animation, and studying the workflow using the proposed system. In the proposed method, the modeling process is skipped and the serial number of the slice images are created by the animation creation tool and sent directly to the 3D printer. Users can design models using visual techniques such as image processing technology and key frame animation. We made several modeling experiments using the system, and analysis and discuss on the examples. As a result, we obtain models with complex internal shape. Especially this method is useful in making abstract shape like generative art.

1. はじめに

3D プリンタの普及に伴い、誰もが自分で作成したモデルやダウンロードしたモデルを実世界に出力することが可能になった。近年では 3D プリンタの機能的な向上だけではなく、造形の表現をいかにして拡張していくかということが重要な研究領域となっている。例えばデジタルアートの分野では、3D プリンタが用いられた事例は多く、プリンタの精度を生かした緻密な作品だけでなく、造形失敗時の不規則性を生かしたアート作品[12]や造形中に介入することで新たな表現を模索する試みも存在する[11][13]。

様々な種類の 3D プリンタが普及しているが、中でも光造形方式と呼ばれる 3D プリンタは、高い造形精度を持ちながら、造形速度の向上や低コスト化が進んでおり注目されている。光造形 3D プリンタは光で硬化する特殊な樹脂を用いて造形を行う。造形する 3D モデルはスライスという手順を経て、モデル断面の連番画像に変換され、画像を基にプロジェクタの照射・非照射位置を決定する。つまり光造形 3D プリンタはその設計上、出力されるモデルはスライス画像の連番（映像）として表現されるといえる。

本研究の目的は、立体形状のデザインに映像編集技法を取り入れることで 3D プリント表現の拡張をしていくことである。本稿では、モデルのスライス処理を行わず、映像制作と同じ要領で作成したスライスアニメーションから直接立体物を生成する手法を提案し、プリントのためのパイプラインを構築した。

提案手法では造形物のデザインにキーフレームアニメーションや画像エフェクトのような映像編集技法、expression などの映像プログラミング要素を取り入れることができる。アニメーションやエフェクトが複雑になるにつれ、造形結果を完璧に予測することが困難になるため、複雑な内部構造や周期的な形状をもった、いわゆる 3D ジェネラティブアートのような抽象的な形状が生成される。また 3D モデルデータを扱わないため、データ変換などの煩雑な処理が不要であり、データの作成から 3D プリントまで一貫したワークフローとなる。提案システムを用いた造形実験を行い、従来のワークフローと比較し考察する。

^{†1} 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科
Department of Frontier Media Science, Faculty of Interdisciplinary Mathematical Sciences, Meiji University

2. 関連研究

既存の 3D プリンティングのワークフローに介入し、3D プリントによる表現の幅を広げることを目的とした研究が行われている。Torres らは HapticPrint[7]にて造形物の質感、柔らかさ、重さをデザインするためのシステムを作成した。質感や内部構造による造形物の重さは、従来 3D モデリングの段階でデザインする要素である。HapticPrint ではこれらの要素を切り離し、専用のデザインシステムに落とし込むことでユーザビリティを向上させた。

また、光造形 3D プリンタを利用して、造形物の表面に毛のような構造を付与する試みもなされている[4]。毛の生成は、毛の部分となるピクセルの組み合わせをレイヤーごとに調節することで実現しており、従来のポリゴンモデルでは難しい表現を可能にしている。

Kanada は FDM 方式の 3D プリンタの造形物が造形方向によって見栄えや性質が変化することに着目し、方向を自由に指定して印刷する non-horizontal 3D printing を提案した。ベクトルの情報を持ったジェネラティブな 3D モデルのデザイン手法とその造形方法について述べている[1]。

3D プリンティングワークフローを効率的に再構築する試みも行われている。例えば Desai らは 3D プリンタで 2 色印刷をする際のモデル設定をより効率的にしたパイプラインを構築した[10]。この研究では、マテリアルやそれを適応するジオメトリの選択などの処理をモジュール化することによって、管理が容易になり、モジュール単位での再利用ができることを利点としている。またユーザは自作のモジュールをシステムに組み込むことができるため、拡張性があることも利点の 1 つとしている。

3. 提案システム

本研究で用いた B9Creations 社製光造形 3D プリンタ B9Creator は、専用のソフトウェアを用いて、造形するモデルのスライス画像を生成し、それらをプロジェクタで樹脂槽に断続的に投影・積層していくことで造形を行う。そこでプロジェクタに表示されるスライス画像を任意の画像に差し替えることで造形結果を変更することができる。

提案システムでは、3D モデルを用いたスライス作業を行わず、幾何学図形のアニメーションを制作し、それらをスライス画像と見立てることで造形物を生成する。生成されるモデルは 2D 形状の変化・動きを可視化したものといえるが、これらを予測しながらデザインすることは困難であり、偶発性を含んだ複雑な形状を作成することができる。

図 1 はシステムの構成図である。スライスの作成、編集、3D プリントまでのパイプラインシステムはノードベースのビジュアルプログラミング言語 vvvv を用いて開発した。



図 1 提案システムの概要

3.1 スライス映像の作成

ユーザは任意の映像制作ソフトで 3D プリントのためのスライス映像を作成する。今回使用した B9Creator では 1 フレームにつき 30 μm の厚さの造形物が出力されるため、造形物の高さに合わせておおよその映像の長さを設定する。

映像は白と黒の 2 値で構成し、多角形や円といった基本的な図形の平行移動、拡大縮小、回転を使って作成する。

3.2 映像入力とプレビューシステム

作成した映像をシステムに入力し画像エフェクトを追加して加工するとき、入力データは 3 次元空間上に時間軸に沿って並べられ、3D プリント出力時のプレビュー表示に反映される。ユーザはこのプレビューを確認しながら、エフェクトのパラメータ調整やコマ落とし・コマ伸ばしによって造形物の高さ調整を行う。造形可能性を判定するにはアニメーションの連続性を示す必要があるため、入力映像の全フレームに対して前後フレームと共有しているピクセルが一定数存在することをシステムが確認し、条件を満たすときのみ 3D プリントを行う。

3.3 エフェクトによる造形物の変化

ユーザ体験として、提案手法における画像エフェクトの立ち位置は、通常のモデリングツールにおけるデフォーミングの考え方に近い。デフォーミングとは、3D モデルのバウンディングボックスに対して、ねじる、歪ませるなどのオペレーションを加えることで 3D モデル自体を変形させるものである。本稿ではまず、映像表現の手法でこれらの変形を再現するために造形実験を行った。

vvvv には多くの画像エフェクト用ノードが標準で用意されているため、これらをスライス画像の出力につなげ、パラメータを変化させた。

図 2 は例として直方体とウサギの 3D モデルのスライス画像に対して回転、歪み、分割、反転効果を与える画像処理を加えた際の造形結果である。

以下では各エフェクトに関する詳細を述べる。

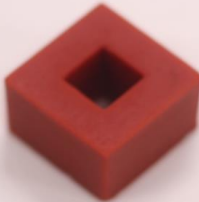
エフェクト	スライス	造形結果	
なし		直方体モデル 	うさぎモデル 
回転			
歪み			
分割			
反転			

図 2 造形実験

3.3.1 回転エフェクト

回転エフェクトではスライス画像を高さによって少しずつ回転させていく。例えば立方体のモデルに回転エフェクトを適用するとネジの様な形状を持った造形物が得られる。回転速度を変化させることで形状を変更する。ユーザー体験として、これらは DCC ツールにおけるツイストデフォーマと呼ばれるデフォーメーション機能に近い。

3.3.2 歪みエフェクト

歪みエフェクトではオブジェクトの断面の形状を段階的に歪めていく。歪みの半径と強さはパラメータで制御することができる。このエフェクトを利用することで、オブジェクトが一定方向に引き延ばされた形状や、部分的に拡大された形状を作ることが可能である。

3.3.3 分割エフェクト

分割エフェクトでは、スライス画像の上からユーザーの任

意の位置に黒い直線を描画する。描画された直線部では造形が行われないため、最終的に造形物は分割された状態で出力される。3D プリントにおいて、造形物の内部構造は造形物の質量や柔らかさを決定する重要なデザインスペースである。従来のモデリングツールでは内部構造を保った状態でモデルを分割することは難しい。分割エフェクトを用いると、より簡単に造形物の分割を行える。

本来のスライス画像の上に直線を描画すると、造形されない領域を決定することができる。

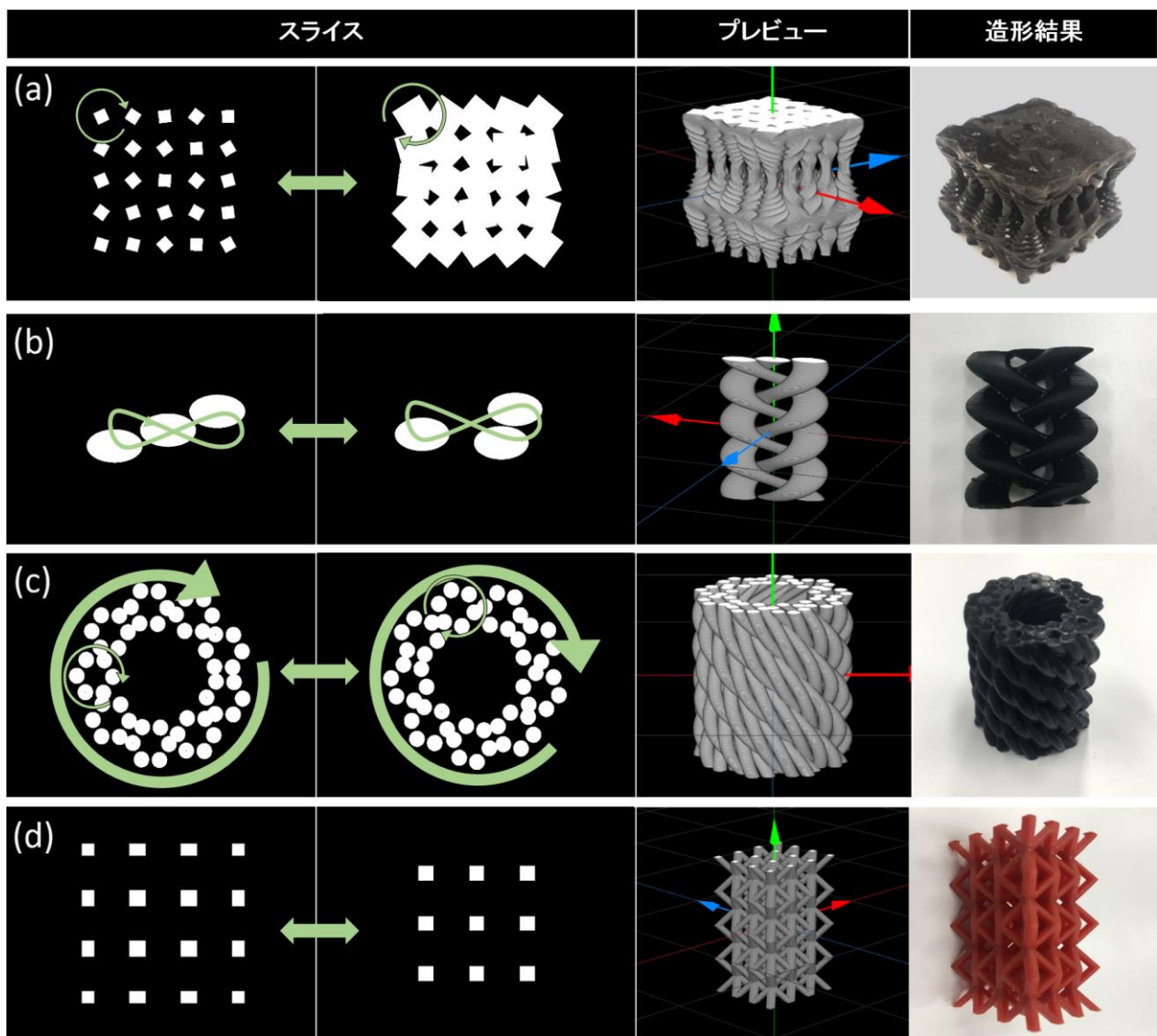


図 3 提案システムを用いた作例：(a)5×5 の正方形がランダムに回転しながら拡大と縮小を繰り返すアニメーション(b)八の字を描きながら動く 3 つの楕円アニメーション(c)円形に並んだ円が回転するアニメーション (d)4×4 と 3×3 のグリッド状に正方形が交互に移動するアニメーション

3.3.4 反転エフェクト

反転エフェクトはスライス画像の 2 値を反転させ、プロジェクタの光照射・非照射位置を入れ替える．これによって例えば立方体から 3D モデルをくり抜いた、鋳型のような造形物を得ることができる．なお、図 2 において得られた造形物の内部は、上記の分割エフェクトと併用することで確認した．

4. 提案システムを用いた作例と分析

本稿では、提案システムを用いて、4 つのスライスアニメーションを作成し造形実験を行った．図 3 は造形プレビュー、スライスアニメーションの様子、実際に出力された造形物を作例ごとに並べたものである．

(a)の作例では、5×5 の正方形がそれぞれランダムに回転しながら縮小と拡大を繰り返すアニメーションを元に 3D

プリントを行った．これによって、なめらかに捻れた柱のような形状が生成された．一般に、ねじれた形状をモデリングするとき、Maya などの DCC ツール上ではデフォーマ機能を駆使して再現可能だが、回転方向の細かい変化やイーザージングの調整が困難である．また、作例のように内部が入り組んだ形状は 3D プリントの際にサポートが生成されてしまい、埋まってしまうケースがあるため、いかにサポートが不要な形状にデザインするか考える必要がある．提案手法では、スライスアニメーションを制作する段階で常に前後のフレームとの連続性を維持することができるため、このような困難な条件をあまり考える必要がない．

(b)の作例では、3 つの楕円が順番に 8 の字を描くように動くアニメーションを入力することで、3 つ編みのような形状が得られた．従来のモデリングソフトでは、このような周期的な形状を作成する際は正弦波を用いて 3 次元空間

上に正確なパスを生成し、楕円形の平面を押し出すことで作成可能ではある。しかし提案手法では2次元のパスアニメーションを元に立体を作成するため、より視覚的に確認しやすい。

(c)は円形に並んだ点が回転するアニメーションを元に造形を行った結果である。糸を束ねたような形状が得られた。回転の速度や方向、円の半径を変化させることで、ダイナミックに形状が変化する。

(d)は4×4と3×3のグリッド状に正方形が交互に移動するアニメーションを入力し造形を行った結果である。作例では正方形はリニアに動いているが、補間方法を変更することで全く異なる形状が得られる。

どの作例でも、単純なアニメーションから、複雑な造形結果を得ることができた。特に複数の図形を同時に回転、移動するようなアニメーションはパラメータを少し変更するだけで大きな変化が得られる。

5. 考察

ボクセルやNURBSなど、オブジェクトを表現するための単位は様々であり、ユーザは一般にモデリングの手法に合わせてこれらを選択していく。しかし3Dプリンタの性質上、出力されるモデルはスライスの前にSTL形式に変換する必要があり、それによって三角ポリゴンで表される。さらにその後、このデータはスライス処理によって連番画像データに変換される。3Dプリンタを用いたプロトタイピングにおいて、これらのデータ変換処理は煩雑であり、そこに意図せぬエラーが生じるリスクもある。工程が少なければ少ないほどこうしたリスクを減らすことができ、作業の効率は向上する。提案手法では3Dプリントのためのデータを一貫して映像として扱うため、スライスやデータ変換にかかる時間を短縮でき、試行錯誤のプロセスをより効率化できたと考えている。

今日、モデリングによって理想の形状を作成するためのアプローチは多々あるが、具体的な目的となる形状が決まっている際は、プリミティブ形状を変形させ少しずつ解像度を上げながらディテールを詰め理想形状に近づけるのが一般的である。しかし、抽象的なモデルのデザインを決定する際、その足掛かりを見つけることが極めて難しい。提案手法を用いた場合、比較的単調な図形アニメーションを元にした場合でも、偶発的に複雑な形状が生成される。ユーザはこれらを足掛かりにして、さらなるパラメータ探索を続けることができる。

6. 結論

本稿では、映像編集技法を用いて3Dプリント造形物をデザインするためのシステムと、そのためのパイプラインを構築した。モデリングと3Dプリントの間の様々なデータ変換を排斥し、出力される形状が一貫して映像データと

して扱うことを試み、造形実験やシステムの運用を行った。

システムを運用した結果基本的な図形のアニメーションと画像エフェクトを利用することで従来のモデリングでは作成が困難である、複雑な内部形状を持った造形物やランダム性を持った造形物が得られた。またスライス画像に対して画像エフェクトを付加することで造形結果を変化させることができた。これらの結果から、立体形状のデザインに映像編集技法を取り入れた造形表現が可能であることが明らかになった。特にジェネラティブアートのような抽象的な形状を作成する際に有用であるといえる。

既存のモデリング手法を映像表現として対応させたとき、画像エフェクトはデフォーマ、画像ピクセルの論理演算はブーリアンモデリングとして利用することができた。

しかし今回のシステムでは造形可能性の評価は、アニメーションが連続しているか否かの確認しか行っていないため、造形時の重力の影響や構造上負荷が集中する箇所を判別できず、プレビューを見て判断するほかない。今後はこうした現象を検証し、エフェクトの種類やアニメーションに制限をかけることで解決していく必要がある。

参考文献

- [1] Kanada, Y. 3D Printing of Generative Art using the Assembly and Deformation of Direction-specified Parts. *Rapid Prototyping Journal*, 22, 4, pp. 636-644, 2016.
- [2] Kanada, Y. 3D Turtle Graphics by using a 3D printer., *journal*, 5, 4, pp. 70-77, 2015.
- [3] Lu, L., Sharf, A., Zhao, H., Wei, Y., Fan, Q., Chen, Z., Savoye, Y., Tu, C., Cohen-Or, D. and Chen, B. Build-to-Last: Strength to Weight 3D Printed Objects, *ACM Trans. Graph.*, 33, 4, Article 97, 2014.
- [4] Ou, J., Dublon, G., Chen, C.-Y., Zhou, L., Heibeck, F. and Ishii, H. Cillia: 3D Printed Micro-Pillar Structures for Surface Texture, Actuation and Sensing. In *Proc. of CHI'16*, pp. 5753-5764, 2016.
- [5] Prevost, R., Whiting, E., Lefebvre, S. and Sorkine-hornung, O. Make It Stand: Balancing Shapes for 3D Fabrication, *ACM Trans., Graph.*, 32, 4, Article 81. 2013.
- [6] Savage, V., Schmidt, R., Grossman, T., Fitzmaurice, and G., Hartmann, B. A Series of Tubes: Adding Interactivity to 3D Prints Using Internal Pipes, In *Proc of UIST'14*, pp. 3- 12, 2014.
- [7] Torres, C., Campbell, T., Kumar, N. and Paulos, E. HapticPrint: Designing Feel Aesthetics for Digital Fabrication., In *Proc. of UIST'15*, pp. 583-591, 2015.
- [8] Rubaiat, H., Tovi, G., Cory, M., Ryan, S., and George, F., ChronoFab: Fabricating Motion. *CHI'16* pp. 908-918, 2016.
- [9] Alexandru, T., Andrei, J., Voxel-Based Assessment of Printability of 3D shapes, *ISMM'11*, pp. 393-404, 2011.
- [10] Desai, Chen., David I.W. Levin, Piotr Didvk, Pitchava Sitthi-Amorn., and Wojciech Matusik., Spec2Fab: A Reducer-Tuner Model for translating Specifications to 3D Prints. *ACM Trans. Graph.* 32, 4, Article 135. 2013.
- [11] Callie, Z., Evan, M., Andre, S., Allison, P., Abby, W., Timothy, L., and Christopher B. Williams., Embedding of Liquids into Water Soluble Materials via Additive Manufacturing for Timed Release, *Solid freeform fabrication'17*, pp. 13, 2017.
- [12] The Art of 3D Print Failure. <https://www.flickr.com/groups/3d-print-failures/>
- [13] Olivivern Herpt. Solid Vibrations. <http://olivivernherpt.com/solid-vibrations/>