

研究終了報告書

「大スケールかつ展開可能な折り紙構造のファブリケーション手法」

研究期間：2020 年 11 月～2023 年 3 月

研究者：野間 裕太

加速フェーズ期間：2023 年 4 月～2024 年 3 月

1. 研究のねらい

3D プリンタやレーザカッタをはじめとするデジタルファブリケーション技術は、今まで工場の特権だったものづくりを誰でも簡単にアクセス可能にし、ものづくりの「民主化」を実現する革新技術である。提案者はこれまで、物体を折りたたんだ状態で 3D プリントし印刷後に展開させる手法「Pop-up Print」の研究を行ってきた。この研究は 3D プリントにかかる長い造形時間と除去作業が煩雑なサポート材消費の削減が主目的だったが、これらに加えこの研究は「非使用時に小さくし使用時に展開させる」操作を極めて簡単に行うことができる点で、他の類似研究と比較し収納性や運搬性に大きく優れていることに気付いた。私は、この性質は家具やテントといった人体スケールの大きな物体で特に大きな効力を発揮すると考え、より大スケールの物体の作製にこの発想を応用できないかと考えた。

この「非使用時に小さくし使用時に簡単に展開できる」性質を持つ構造で近年研究が進んでいるのが剛体折り紙である。剛体折り紙とは、面が剛体で構成され折り目のみが回転の自由度を持つ折り紙構造である。近年、厚みのある剛体折り紙の理論研究が活発になり、剛体折り紙のシミュレーションツール「Crane」が登場する等、計算折り紙（Computational Origami）の分野で剛体折り紙は大きな注目を集めている。一方、既存の剛体折り紙の研究は幾何的な拘束条件に関するものがほとんどで、建築スケールの大規模な剛体折り紙構造物の作製は依然として専門の建設業者に発注する必要があるとその設置作業も一人では困難である等、手軽な作製やユーザの使い勝手という観点では実用と乖離が存在する。

そこで私は、レーザカッタにより切り出された剛体パネルをヒンジで接続すれば、ユーザが安価なファブリケーション機械で手軽に大スケールの剛体折り紙構造を作製可能になると考えた。さらに、異なる面同士を紐で結び、一端を引けば、隣接する面同士で折りたたみが発生し、簡単に折りたたみを実現できる機構を作れることに気付いた。これを利用すれば、ユーザが紐を引っ張るだけで簡単に立体構造の組み立てができると考えた。

本研究が実現できれば、大スケールの剛体折り紙構造の手軽な作製と組み立てが実現できる。提案者は本研究の実現のため、ユーザの 3D モデルまたはインタフェース上でのモデリング結果を入力とし、展開図と紐の配置問題を解き、ファブリケーション可能な 3D モデルのデータを出力するソフトウェアを構想していた。

また加速フェーズでは、「曲面充填のための幾何形状処理（Surface-filling Geometry Processing）」という新たな研究分野を構想し、この実現を目指した。

ある平面を特定の図形で隙間なく敷き詰めることは「平面充填」と呼ばれる。このような平面充填のための幾何学は近代に入ってから数学的な研究対象としても着目されるようになり、近年では画像圧縮やデータの索引付けなど、コンピュータサイエンスの領域でも大きく注目されている。

また私の研究分野であるコンピュータグラフィックスの世界でも、与えられた平面図形を充填するような平面充填曲線や平面を充填するようなタイリングなど、平面充填が可能な図形を計算により求める手法が発表され始めている。

しかし、既存の平面充填の幾何学に関する研究はほとんどが平坦な 2 次元平面の上で議論されている一方で、世の中の多くの工業製品や建築物は 3 次元曲面により構成されている。このため、もし平面充填の幾何学を 3 次元曲面にも発展させることができれば、潜在的により多くの応用先が見込める。そこで私は、平面充填の幾何学を曲面に応用する、曲面充填のための幾何形状処理 (Surface-filling Geometry Processing) という新たな研究分野を構想するに至った。

本研究では、曲面充填のための幾何形状処理技術として、1. 曲面を充填する曲線と 2. 曲面を充填するタイリングの 2 種類を、ユーザのインタラクティブな操作を反映しながらも計算により生成できるアルゴリズムを研究することを目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

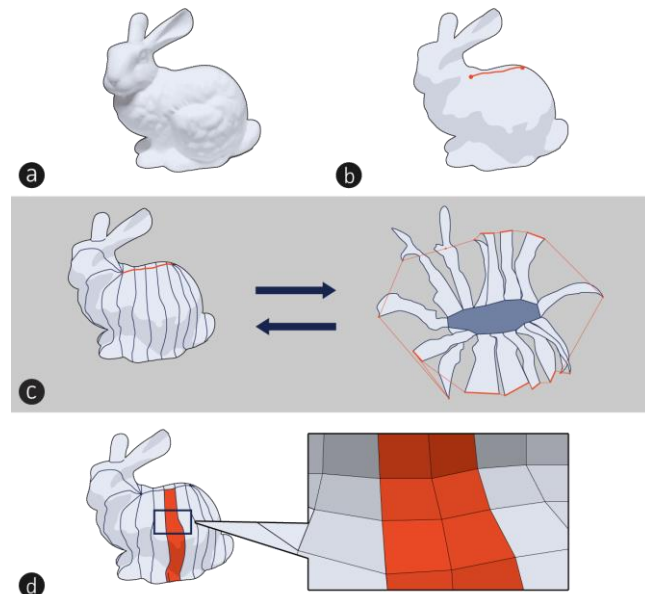


図 1: 本研究で造形される最終的な展開図の様子。(a) 入力形状、(b) 紐の結び目位置、(c) 紐を用いて展開図を組み立てる様子、(d) 展開図の葉が四角形の剛体パネルで構成されている様子。

本研究では当初、大スケールな展開可能構造の製造を目的として、図 1 のような自由形状を容易に組み立て可能な展開図に変換する手法の構築を目指していた。この展開図は、図 1b で橙色の曲線で示す「紐の結び目」と図 1c に青色で示す「底面」、そして底面と紐の結び目とを結ぶ「葉」で構成されている。このため、葉の上側を紐で結んでおき、この紐を結び上げることで、図 1c のように形状を容易に組み立てることが可能になる。

このような手法の実現のため、当初は形状表面に配置した接ベクトル場に沿って形状表面に切り込みを配置する方法を模索していた。しかし研究を進めるにつれ、そもそも接ベクトル場を利用した幾何形状処理技術自体が未成熟で、より一般的な技術課題を解決する必要があることに気付いた。

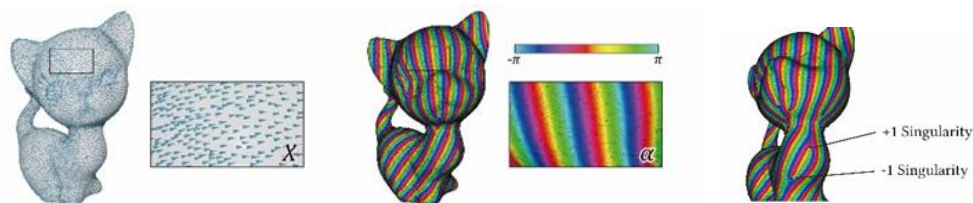


図 2: Field-aligned parametrization で生成した縞模様。(左) 入力した接ベクトル場、(中) 生成した縞模様、(右) 縞模様の特異点の様子。

そこで本研究ではまず、接ベクトル場を利用した幾何形状処理手法において頻繁に用いら

れる Field-aligned parametrization に着目した。Field-aligned parametrization は、勾配が入力した接ベクトル場となるべく近くなるようなスカラー関数を曲面上に配置する手法である(図 2)。実際の数値計算では、アルゴリズムは三次元形状の各頂点にそれぞれ実数値を割り当てるが、この実数値が等しい値となる点同士を繋げば、形状表面に定義した接ベクトル場に対して垂直な縞模様が生成できる(図 2 中)。

この縞模様はコンピューテーショナルファブリケーションをはじめ様々な応用先が存在する一方で、縞模様の分岐する点である「特異点」(図 2 右)の配置が最終形状の機能性や美観に大きな影響を及ぼす。このため、特異点を必要な箇所に配置する一方で、不要な箇所からは取り除けるようにする必要がある。特に、本研究で当初構想していた展開図の生成のためには、形状表面に配置する切り込みの分岐を防ぐ必要があり、特異点を不要な箇所から取り除けることが重要である。

そこで本研究では、指定した箇所が特異点となるかどうかを事前に拘束条件として指定したうえで縞模様を計算できる手法を提案し、これを利用して複数のものづくりへの応用例を提案した。この成果を含む論文は ACM SIGGRAPH Asia 2022 に採択済みである [1]。

(2) 詳細

本研究で当初想定していた展開図は、形状の「紐の結び目」(図 1b に示す橙色の曲線)と「底面」(図 1c に示す青色の面)とを結ぶような「葉」で構成されている。そこで、曲面上になるべく測地線に沿った滑らかな曲線を配置しながら、その曲線が紐の結び目と底面の両方を接続する必要がある。

このような展開図を実現するためには、配置した紐の結び目から流出し、形状の底面に流入するような接ベクトル場を生成し、その接ベクトル場に平行な縞模様を生成すればよい。しかし、このような縞模様に分岐点があると、紐の結び目や形状の底面に接続されていない葉が発生してしまい、容易に展開図を組み立てることができなくなってしまう。そこで、縞模様の特異点が発生しないような縞模様を生成する必要がある。

しかし調査の過程で、接ベクトル場を利用した縞模様の生成手法が未成熟で、特異点が特定の箇所に出現しないように制御することが当時の State of the art では不可能であることが分かった。そこで本研究ではより一般的な課題として、接ベクトル場を元に縞模様を生成する Field-aligned parametrization の特異点の配置を正確に制御でき、またその配置を自由自在に編集できるアルゴリズムを構想するに至った。

そこで本報告書では、これを「Field-aligned parametrization による縞模様の特異点の編集アルゴリズム」と「特異点編集のアルゴリズムの実世界応用」に分けて説明する。

研究テーマ「Field-aligned parametrization による縞模様の特異点の編集アルゴリズム」

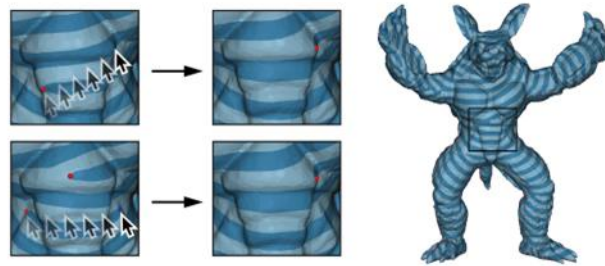


図 3: Field-aligned parametrization による特異点を編集する様子。

本研究では、特異点をユーザの好ましい位置に配置し好ましくない位置から外すことができることを目的に、インタラクティブな操作を許すほど高速に特異点の位置を変更できるアルゴリズムを構築した(図 3)。

本研究の手法では問題を線形等式二次制約最適化に帰着させたため、変分問題は線形方程式系の求解と同値であり、行列分解により容易に求めることができる。さらに、この行列分解は特異点の配置とは独立なため、一度行列分解を計算しておけば、特異点の再配置をインタラクティブな操作を許すレベルで高速に行うことができる。ゆえに、～10K のメッシュ数を持つ入力形状に対しても非常に高速に動作する。

研究テーマ「特異点編集のアルゴリズムの実世界応用」

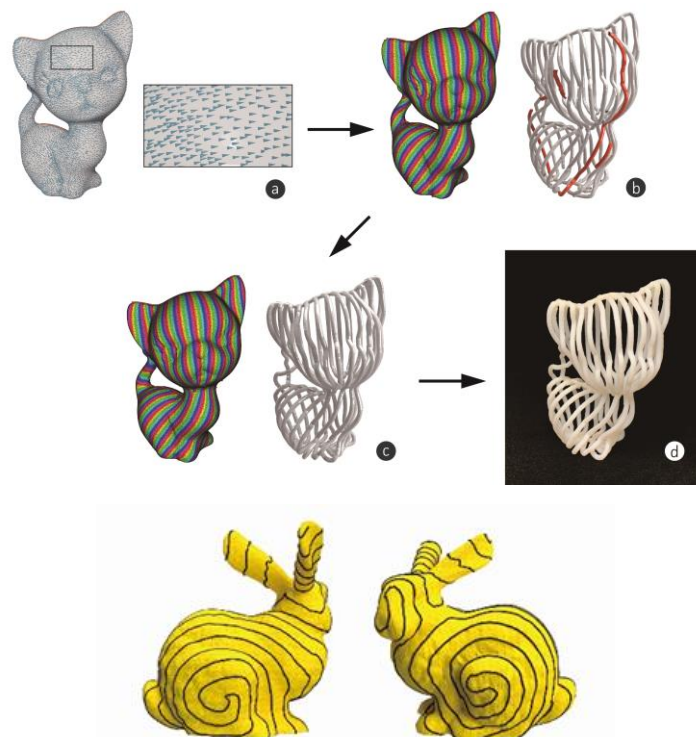


図 4: 特異点編集のアルゴリズムの実世界応用の例。(上)ワイヤーフレーム構造の設計、(下)展開図にも利用可能な切り込み。

本研究により開発したアルゴリズムを利用すれば、形状の 3D プリントにおける樹脂消費の削減を目的としてワイヤーフレーム構造の設計に応用できる(図 4 上)。このワイヤーフレーム構造は特異点があると図 4 上 b の橙色に示した箇所のようにどこにも接続されていないパスができてしまうが、これをインタラクティブに特異点位置を編集するアルゴリズムを利用すれば、全体が繋がった状態のワイヤーフレーム構造に変更することが可能である。また、図 4 下に示すように、螺旋状の曲線の特異点を排して形状上に配置することもでき、これは本研究の当初目標でも掲げていた展開図にも応用可能である。

加速フェーズ追記

研究テーマ「曲面充填曲線」

曲面充填曲線とは、特定の曲面を一筆書きでなるべく充填するような曲線である。

今回の研究期間では、図 7 に示すような「最適化が進むほど曲面を充填していく」よう曲線を進化させる計算を行う技術を得た。

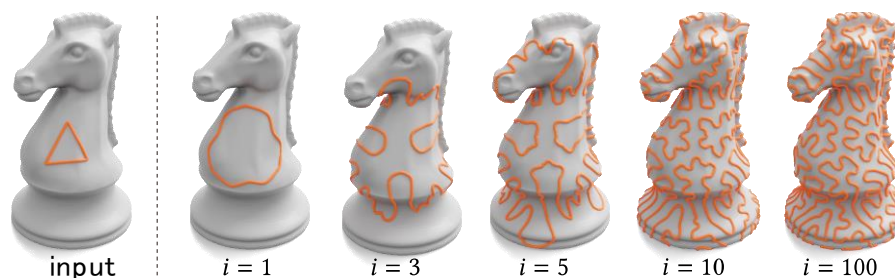


図 7: 曲面充填の最適化が進む様子。

本研究により得られた手法は、既存の研究と比較して (1) 100-10000 倍高速、(2) 多様な形状に対して堅牢、(3) ユーザが多様なパラメータを通じて最終形状を制御可能、という 3 つの利点があることがわかった。

研究テーマ「曲面充填タイリング」

曲面を充填するタイリングについては、今回提案した陽的表現を利用することで実現する方法を現在模索中である。

3. 今後の展開

本研究で扱った Field-aligned stripe patterns による縞模様は、曲面の上をなるべく充填するような曲線群を計算する手法としてみなすことができる。曲面充填を行う曲線や多角形は、主に物体の製造において非常に好ましい性質を持つ。このことから、私は「曲面充填のための幾何形状処理技術」という題で加速フェーズへの申請を行い、本研究をさらに発展させていく予定である。

加速フェーズでは、曲面充填のための幾何形状処理について、陰的表現と陽的表現の

二種類のアプローチを試み、双方の特性と課題を見極めることができた。特に、陽的表現を用いた手法は新規性が顕著であり、曲面上に定義した曲線の最適化技術は今後本研究の成果を元に行われていくと考えている。

加速フェーズ期間中は、近年流行している Neural Fields や Gaussian Splatting と呼ばれる曲面の形状表現に関して見聞きする機会が多かった。訪問研究先のトロント大学はこれらの形状表現に詳しい研究者が多く、彼/彼女らの生きた意見に触れることができた。今回得られた成果のような古典的な離散微分幾何に基づいたアルゴリズムを、新たな形状表現に応用する方法を考えることも、今後の研究の一つの方向性になると考えている。

4. 自己評価

本研究を通じて、私は Field-aligned parametrization を利用した縞模様の特異点の編集という、接ベクトル場を利用した実世界応用には欠かせない研究項目にまで問題を一般化し、課題の解決まで行うことができた。本研究の成果はコンピュータグラフィックスのトップ会議である SIGGRAPH Asia へ採択され [1]、複数の受賞も経験するなど [3, 4, 5]、研究期間内に一定の研究成果を挙げることができたと考えている。

研究実施体制については、私自身が中心として活動しつつ、適宜コンピュータグラフィックスの専門家の指導を仰ぎ、論文化まで漕ぎつけることができた。また研究費執行は、コロナ禍もあり渡航費として使用できなかったため思うように進まなかったものの、海外で行われる学会への出席や海外の大学に visiting student としての研究訪問を 2022 年度中に行う予定であり、有効に利用できる予定である。

本研究を通じて、私は「曲面充填のための幾何形状処理」という新たな研究分野を発見し、加速フェーズで取り組む予定である。曲面充填のための幾何形状処理は、実世界の物体製造の最適化に資する手法であり、サステナブルなものづくりや新たなインタラクション技術といった社会課題の解決や新たなビジネスの創出へも遠からず繋がっていくものだと考えている。

また ACT-X の目標である「研究者ネットワークを形成しながら研究者としての個を確立する」という観点に照らせば、本研究は私自身がコンピュータグラフィックスや幾何形状処理の専門家としての礎を確立する期間にできたと考えている。本研究の開始当初、私は必ずしも当該分野の専門家であると言えるわけではなかった。しかし、ACT-X の特に微分幾何や数理解最適化を研究する研究者たちとの交流やディスカッションを通じて異分野へ触れるきっかけをいただけたことで、本研究の最終成果のような数理とインタラクション技術の融合研究を遂行でき、結果的に日本でも数少ない幾何形状処理の研究者としての地位を確立することができた。

加速フェーズでは、トロント大学にて約一年間訪問研究を実施した。トロント大学は、ETH/MIT/CMU 等と並び、コンピュータグラフィックスの業界では世界屈指の業績を誇る名門研究機関である。ここにまとまった期間身を置き、世界最先端の研究者たちの文化に触れることにより、陽的な曲面充填曲線のような非常に強力な研究成果を生み出すことができた。

また、加速フェーズ期間では米国東海岸での講演や研究室訪問等も実施し、今後国際的



な研究者として活躍していくための人脈も手に入れられたと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3件

1. Yuta Noma, Nobuyuki Umetani, and Yoshihiro Kawahara. 2022. Fast Editing of Singularities in Field-Aligned Stripe Patterns. In SIGGRAPH Asia 2022 Conference Papers (SA' 22 Conference Papers), December 6–9, 2022. 8 pages.

Field-aligned parametrization は、勾配が入力した接ベクトル場となるべく近くなるようなスカラー関数を曲面上に配置する手法である。これを利用すれば、多様な目的で利用可能な縞模様を曲面上に配置できる。この時、縞模様が分岐する点である特異点は、最終形状の応用先における機能性や製造性、美観に大きく影響する。そこで本研究では、特異点をインタラクティブに編集可能な高速なアルゴリズムを提案した。

(2) 特許出願

なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

2. 野間裕太、川原圭博、“3 次元メッシュにおける特異点を与えた沿ベクトル場パラメータ化、” 研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学(CG)、2022-CG-185 巻、8号、pp.1-8、2022 年 3 月。
3. 工学系研究科長賞, 2022 年 3 月。
4. 優秀研究発表賞, 第 185 回 CGVI 研究会, 情報処理学会, 2022 年 3 月。
5. 学生発表賞, 第 185 回 CGVI 研究会, 情報処理学会, 2022 年 3 月。
6. Naoki Agata, Anran Qi, Yuta Noma, I-Chao Shen, and Takeo Igarashi. 2023. Computational Design of Nebuta-like Paper-on-Wire Artworks. In ACM SIGGRAPH 2023 Posters (SIGGRAPH '23). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 7, 1–2. <https://doi.org/10.1145/3588028.3603655>