

1. 担当 PM

竹迫 良範（神山まるごと高専 デザイン・エンジニアリング学科 教授）

2. クリエータ氏名

谷口 朝洋（慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科）

3. 委託金支払額

2,880,000 円

4. テーマ名

ロボットコンテストのための 3D プリントプリプロセッサの開発

5. 関連 Web サイト

- 公式サイト：<https://strecs3d.xyz>
- GitHub：<https://github.com/tomohiron907/Strecs3D>

6. テーマ概要

本プロジェクトでは、3D プリントにおける軽量性、製造時間、部品強度という 3 要素のトレードオフを一挙に解決するソフトウェア「Strecs3D」を開発した。3D プリンタで造形したものには、外壁部分と内部の格子状の充填部分（インフィル）という構造があり、内部格子を密にすれば強度は高まるが重量と製造時間が増えてしまい、疎にすれば軽くなり素早く製造できるが、逆に壊れやすくなるというトレードオフが存在していた。さらに、従来の 3D プリントでは内部格子の密度は調整できるものの、パーツ全体で一様な密度になってしまうため、力がほとんどかからない部分にも無駄に材料を使用してしまい、不要に時間がかかり重量も増加してしまうという問題があった。この問題を解決するため、本プロジェクトでは、パーツの使用時の固定方法や力のかかり方を考慮し、応力解析によって応力が低い部分には疎、応力が高い部分には密な内部格子を生成することで、材料を効率的に使用し、製造時間を短縮しながらも必要な強度を実現することに成功した。

7. 採択理由

従来の3Dプリント工程では、部品全体に対して一様な内部充填（インフィル）密度が設定されるため、力のかからない部分に対しても不要な材料が使われてしまい、プリント時間とフィラメントの無駄が生じていた。これに対し本提案では、CADデータに対して応力解析を行い、部位ごとの力の分布に応じてインフィル密度を効率化することで、材料を節約しながら必要な剛性を確保し、プリント時間の短縮と軽量化を両立することを目標としている。とりわけ重量制限や耐久性が求められるロボットコンテストをターゲットとし、競技参加者がより効率的かつ短期間に部品製造できることを目指している。

ロボットコンテストに出場するチームが現場で部品を3Dプリンタで製造する際に、このソフトウェアのプリプロセス処理を施すことが一般的になれば、単なる個人の便利ツールにとどまらず、多くの人を使うソフトウェアに発展する可能性が高い。また、ロボットコンテストに限らない一般の3Dプリンタのユースケースにも広く展開することでできれば、3Dプリンタで消費するフィラメントの無駄、時間の無駄、電気の無駄をなくすることができることも高く評価した。二酸化炭素排出量を減らすSDGs目標にも貢献することができる。

応力解析の精度や、熱耐性素材の選定、積層方向を考慮した解析、対象形状への汎用性、また誰でも扱えるようなインタフェース設計などいくつかの課題があるが、それらの改善を進めることで、ロボットコンテストのみならず、3Dプリンタを使う全ユーザが使うソフトウェアとして発展することを期待している。

8. 開発目標

本プロジェクトの目標は、設計（CAD）と製造（スライサー）の間に「スライシング・プリプロセッサ」という新たな層を介在させ、力学的根拠に基づいた内部構造の最適化を実現するソフトウェアを開発することである。力がかからない部分は疎にし、力がかかる部分のみを局所的に高密度化することで、3Dプリントパーツの軽量化と高強度化の両立を目指した。具体的にはCADデータに対して応力解析を行い、部位ごとの力の分布に応じてインフィル密度を効率化することで、材料を節約しながら必要な剛性を確保し、プリント時間の短縮と軽量化を両立することを狙った。

加えて、既存のスライスソフトやワークフローを破壊することなく、高度な構造最適化をシームレスに導入可能なプリプロセスというワークフローを実現することも目標とした。とりわけ重量制限や耐久性が求められるロボットコンテストをターゲットとし、競技参加者がより効率的かつ短期間に部品製造できることを目指すが、ロボットコンテストに限らず、一般の3Dプリンタのユースケースにも広く展開し、フィラメント、時間、電力の無駄を減らし、より広いものづくり分野で利用されるソフトウェアへ発展させることも目標にした。

9. 進捗概要

スライスソフトで加工プログラムを作成する前に前処理を行うソフトウェア「Strecs3D」を開発した。主に C++言語を用いて実装し、直感的な GUI を備えたデスクトップアプリケーションとなるように開発を進めた。本システムでは次の3つの主要ステップによって最適化処理を実現した。

- (1) 内部に有限要素法 (FEA) ソルバ「CalculiX」を組み込み、専門知識がなくても 3D モデル (STEP 形式) に対して荷重・拘束条件を直接設定し、応力分布を算出できるようにした。
- (2) Gibson-Ashby モデルを基にした独自のアルゴリズムを用い、解析結果の応力値に応じてモデルを複数の領域に分割し、各領域に最適なインフィル密度を自動的に割り当てた。
- (3) 形状情報と製造パラメータを統合し、Ultimaker Cura、Bambu Studio、Prusa Slicer が解釈可能な 3MF (3D Manufacturing Format) ファイル形式でデータを出力する仕組みを実現した。

技術面では、スライサーそのものを代替するのではなく、スライサーへの入力を最適化する 3MF メタデータを生成するプリプロセッサ・アプローチを採用したことで、ユーザは使い慣れた印刷設定をそのまま活用できる形に仕上げた。さらに、積層造形特有の「層間剥離」に対する脆弱性を評価に加味した応力算出アルゴリズムを実装し、各社スライスソフトの 3MF 仕様をリバースエンジニアリングにより解析することで、ベンダを問わない最適化データの流し込みを実現した。これにより、インフィル密度をはじめとする製造パラメータを、荷重条件や応力分布に最適化された値として自動的に割り当てることが可能となった (図 1)。

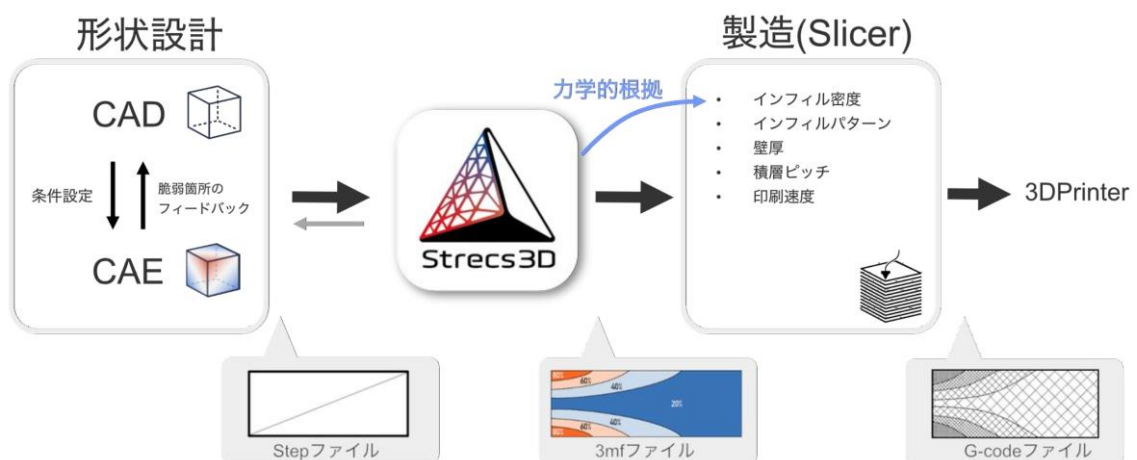


図 1 : Strecs3D を用いたワークフロー

10. プロジェクト評価

実装面では、技術的に難易度の高い有限要素法ソルバの組み込みと、応力分布に基づく領域分割と密度割り当て、さらに各社 3MF メタデータとしての出力までを粘り強く開発し、実用性の高いレベルまで仕上げた。3MF 形式は各社によって独自の仕様拡張が行われており、ブラックボックスになっていたが、リバースエンジニアリングすることで各社の既存スライサーをそのまま活用できるようにした。既存スライサーをそのまま活用できる形で最適化結果を流し込む構成は、ユーザに新たな負担を強くない設計になっており、3D プリントユーザの実用性を第一に考えて難易度の高いことにもチャレンジして実装している開発姿勢が表れていたと言える。

評価面では、3 点曲げ試験による定量的評価を実施し、同一の質量でありながら、Strecs3D を適用した造形物は従来の均一密度モデルと比較して、最大耐荷重で約 1.97 倍、等価曲げ剛性で約 1.65 倍の向上を達成した。ユーザビリティ評価実験では、SUS スコア 69.29 点という良好な評価を得ており、比較対象とした手動設定手法の 30.00 点を大きく上回った。

当初はロボコンチームを主要なターゲットとしていたが、開発したソフトウェアの完成度と実用度が高いため、オープンソースを通じたコミュニティ展開や 3MF フォーマットを活用した製造エコシステムへの展開も現実的になったため、より広い利用者層への普及を目指す段階に進んだと評価できる。

11. 今後の課題

現在の実装では初期形状の応力分布を一度だけ使って密度を決めているが、密度を変えたことで応力の流れ自体が変わってしまう。そのズレを放置すると最適化としては不十分になる。そのため、密度更新と応力解析を繰り返し、収束するまで反復計算する最適化の仕組みが今後の課題として残っている。また、インフィルの作り方も離散的なため、領域ごとに密度を切り替える方式では境界に不連続が生まれ、そこが弱点になる。応力は連続的に分布しているのに構造が段差的になってしまっている。このギャップを埋めるために、TPMS のような数式ベースの構造を使って、空間的に滑らかに密度が変化するインフィルの生成アルゴリズムの開発も必要である。まだ世界的にも取り組んでいるプレイヤーがほとんどいない領域でもあるため、未踏プロジェクト終了後に博士後期課程の研究テーマとして継続して取り組んでいくことを期待したい。