

ロボット 3D プリンティングにおけるパスの生成に関する研究 積層可能な三次元曲線と造形物の応力状態に基づき最適化された曲線の生成 A Study on Path Generation of Robot 3d Printing Generation of printable 3D curves and curves optimized for stress status of a modeled object

○寺田 泰地*¹, 平沢 岳人*²
Taichi TERADA*¹, Gakuhiro HIRASAWA*²

*1 千葉大学 融合理工学府 博士前期課程

Graduate Student, Graduate school of Science and Engineering, Chiba University

*2 千葉大学大学院 工学研究院 教授

Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University.

キーワード : 六軸ロボット; 3D プリント; 三次元曲線; 構造解析; 有限要素法; 引張応力;

Keywords: six-axis robot; 3D print; 3D curve; structural analysis; finite element method; tensile stress

1. はじめに

1.1. 研究背景

近年, 新しい表現技法による 3D プリント構造物の事例が増加してきている(図 1)。腕型ロボットを用いて金属材料を水平に積層していくことで造形した橋¹⁾, さらに今年度開催された東京オリンピックでは, 再生利用によるプラスチック材料で大型の表彰台が製作された²⁾。このように, 従来の建築生産技術, 材料とは大きく異なる新しい構造物の生産方法が検討されている。



図 1 近年の 3D プリント事例¹⁾²⁾

1.2. 研究目的

昨年度, 千葉大学平沢研究室では産業用腕型ロボットによる 3D プリントの表現技法に関する研究を行った³⁾⁴⁾。そこで行った家具の造形では, 形状に合わせて造形パスの生成を適宜行っていたが, より複雑な形状になる場合を考え, パス生成の効率化が求められていた。

また 3D プリンターによる造形物は, 積層方向の圧縮力に比べ, 引張力に弱いという力学的に異方性があることが挙げられる。しかしロボットを用いることで, 局所的に積層方向を変化させることが出来るため, 引張応力を考慮した造形を行える可能性がある。

本研究では, 読み込んだ形状から積層可能な造形パスを自動で生成するアルゴリズムの構築, さらに造形に生じる引張応力に対して最適化した積層曲線の生成を行い, ロボット 3D プリントの表現技法の拡張を目的とする。

2. 造形パス生成アルゴリズム

2.1. 材料吐出量の制御

腕型ロボットによる三次元的表現拡張のため, 材料の吐出量を連続的に変化させるアルゴリズムを構築する。本研究での造形ワークフローを図 2 に示す。設計した造形の積層間距離を元に吐出量データを生成, マイクロコントローラー上のプログラムに記述する。ロボットから繰り返し信号を送り, 値を連続的に呼び出すことで積層地点に応じて吐出量を変化させることが出来る。

吐出量制御による波形の積層痕を持つオブジェの造形を行なった。適切に初期吐出量を設定することで, より自由度の高い三次元曲線での造形が可能となった。(図 3)

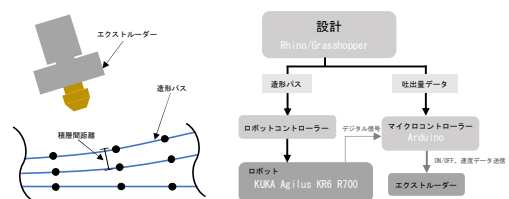


図 2 造形ワークフロー

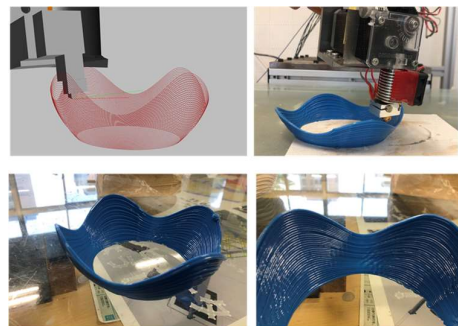


図 3 波型積層痕のオブジェ

2.2. 自由曲面の等距離分割法

与えられた任意形状に応じた積層経路の自動生成アルゴリズムの構築を行なう。

まず造形形状、積層開始平面、積層間隔から、曲線間距離が全て等しい曲線を生成する。造形形状と積層開始平面の交差曲線を抽出する。抽出した交差曲線を分割し点群を生成し、交差曲線の分割点上での傾きを法線、かつ指定した曲線間距離を半径とした円を生成する。円と造形形状の交差点から積層曲線を生成する。以上を繰り返す事で等距離積層曲線を生成することが出来る（図4）。

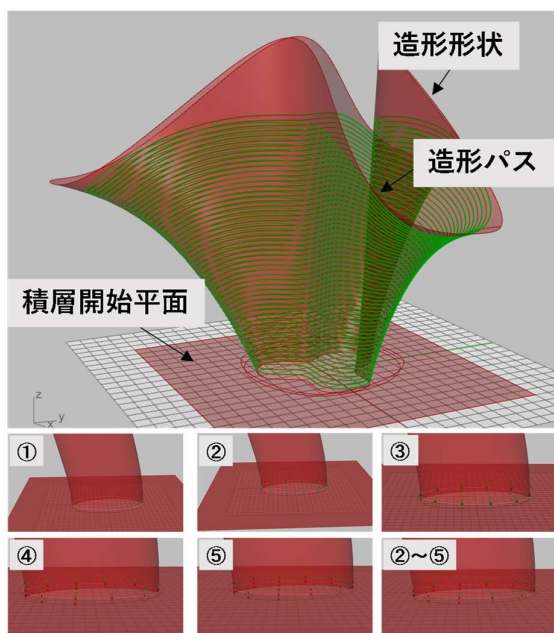


図4 等距離分割法アルゴリズム

2.3. 積層方向変換、間隔調整法

次に、造形の形状に従って積層方向を変換し曲線間隔の自動調整を行なうアルゴリズムを構築する。

等距離分割による積層曲線と方向変換調整アルゴリズムによる積層曲線、またその生成フローを図5に示す。等距離分割法同様に、曲線上の点群から、曲線の傾きを法線とする円を生成する。その後、造形形状と円の交差点群の平均点、円を生成した点群の平均点からベクトルを抽出する。さらに円生成点群と、その一層前の積層曲線における点群の平均点からベクトルを抽出し、2つのベクトルの傾きを円の交差点群に反映させる事で、積層方向の変換と間隔の調整を行なう。

またアルゴリズムを適用した場合、曲線間距離は連続的に変化するため、造形の際は吐出量の制御を並行して行う。実際に造形した物を図6に示す。

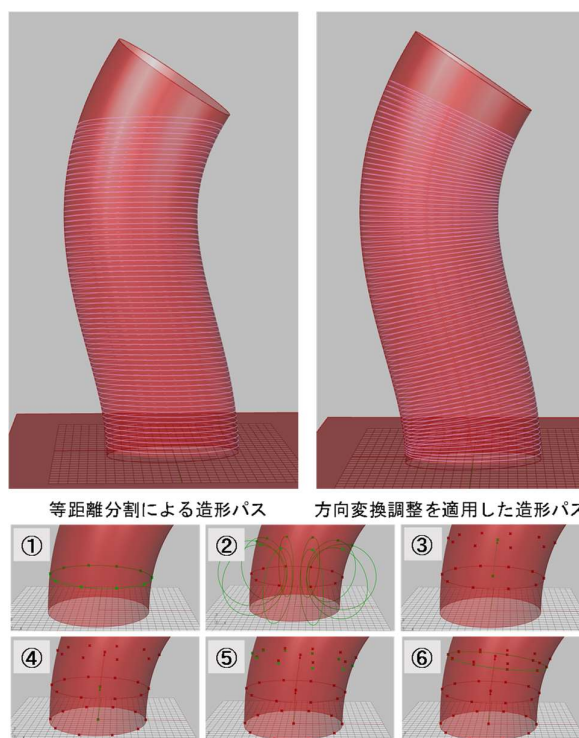


図5 方向変換、間隔調整アルゴリズム



図6 造形物のプリント

2.4. 分岐形状の積層経路生成

分岐形状に対して積層曲線の自動生成を行なうアルゴリズムの構築を行う。

基本的に等距離分割方法、積層方向変換調整方法を用いるが、曲線を生成する際にその都度平面を作成し、平面と造形形状の交差曲線の個数から分岐の判定を行なう（図7）。交差曲線の個数に変化があれば、それまでの積層曲線の生成を終了し、分岐箇所それぞれに第一層目を生成する。その後、分岐箇所それぞれを造形形状、生成した第一層目を積層開始曲線として、等距離分割法、積層方向変換調整法を適用する。

以上のアルゴリズムを適用した分岐形状の造形物を図8に示す。

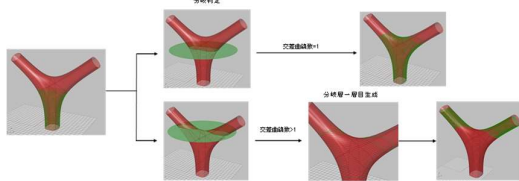
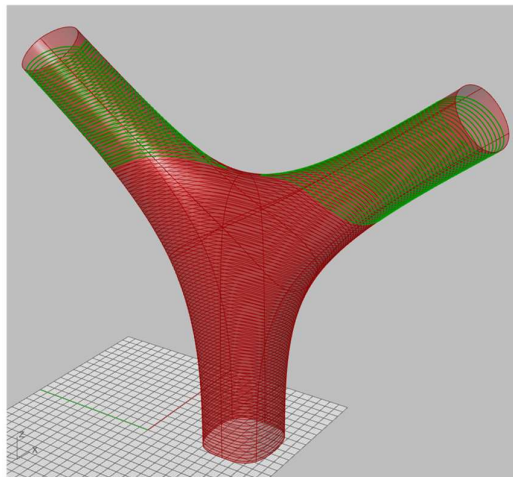


図7 分岐パス生成アルゴリズム

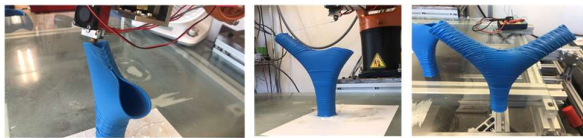


図8 分岐形状の造形

2.5. 引張応力に対応した積層曲線の生成

積層造形では積層方向の圧縮には強いが引張には弱い、という構造的な異方性がある。その特性を踏まえ、造形物に生じる引張応力に対して最適化した積層を検討する。

生成の前に、造形物の構造解析を行ない、応力状態を得る必要がある。本研究では、文献⁶⁾を参考に自作した10節点四面体二次要素(図9)による有限要素解析プログラムを用いる。

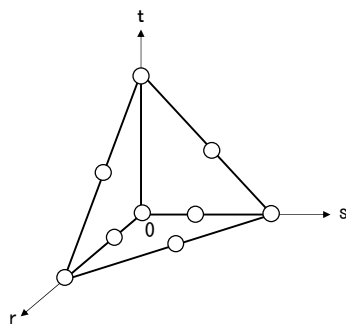


図9 10節点四面体二次要素

構築した解析プログラムによる、中央に集中荷重を単純梁の解析、得られた解析結果を図9に示す。

解析結果から、設定した引張応力の閾値(例えば積層面の剥離強度)を超える、またそれに近い主応力を持つ要素を抜き出す。この要素範囲を引張繊維積層の適用範囲とする。抜き出した要素範囲内に、それぞれの要素が持つ主応力ベクトルをつなぎ合わせ曲線を生成する。それらを引張応力積層経路とする(図10)。

造形形状の中で主応力積層の適用範囲外は、上記の積層パス自動生成アルゴリズムを用いての生成を行なう。

三次元の単純梁を造形する場合、まず積層パス自動生成アルゴリズムによる曲線を材軸方向(今回は材軸方向をz方向とする)に積層し、その後形状につけ加えるように水平方向から引張繊維積層を行なう(図11)。より複雑な形状であってもこのように造形を行う事で、引張応力を考慮した造形が可能であると考えられる。

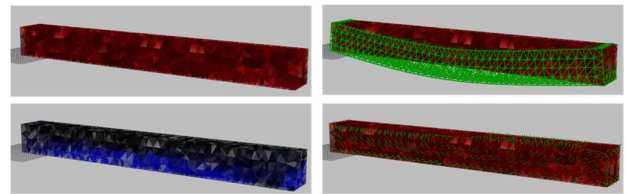


図9 構造解析結果(解析モデル、変形、引張応力分布、主応力ベクトル)

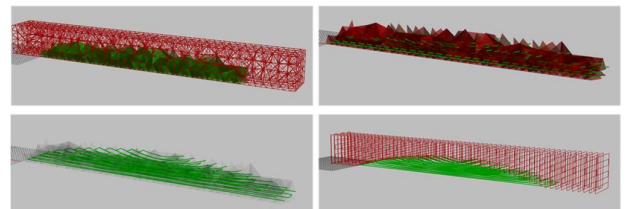


図10 単純梁の引張応力線パスの生成

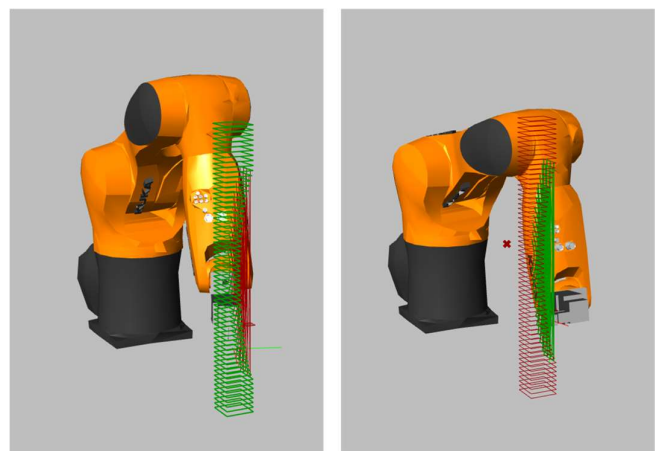


図11 造形シミュレーション

3. 複雑な構造物のパス生成

これまで構築してきた積層パス生成アルゴリズムを用いて、ローテーブルの脚部（図 12）を対象に造形パスの生成を行う。

積層パス生成アルゴリズムを適用した曲線を図 13、引張応力線パスの生成を図 14 に示す。

これらの曲線を統合した造形パス、造形シミュレーションを図 15 に示す。積層アルゴリズムパスをベースに、それに付け加える形で引張応力線パスの積層を行う。プリント段階に応じて環境を適切に設定することで、このような複雑形状の造形が可能であることを確認した。

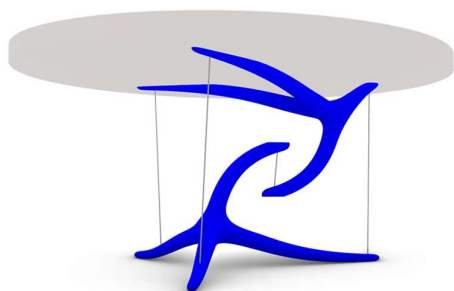


図 12 ローテーブル

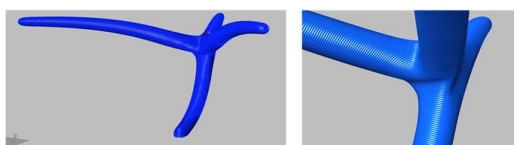


図 13 積層パス生成アルゴリズムによる曲線

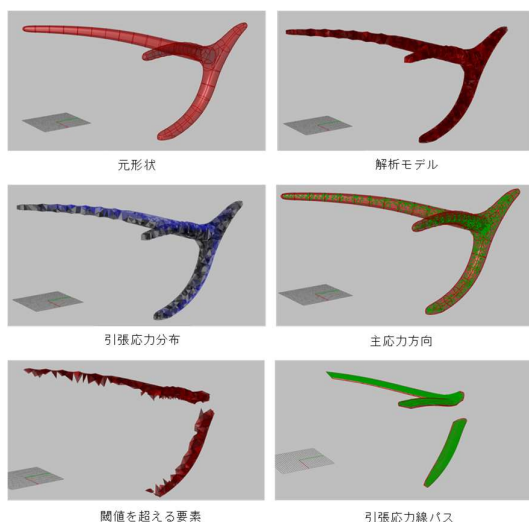


図 14 引張応力線パスの生成

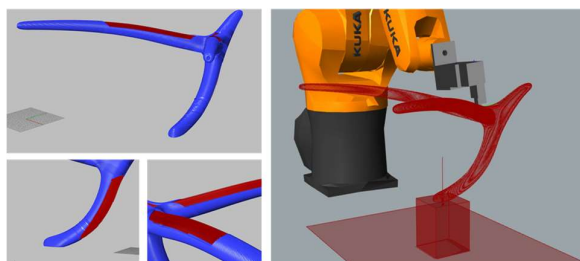


図 15 統合した造形パス、シミュレーション

4. まとめ

本研究では、昨年度当研究室で行われたロボット 3D プリントの表現技法拡張を目的とし、積層パス自動生成アルゴリズムの構築、また造形に生じる引張応力に対して最適化した積層曲線の生成を行った。

積層パス自動生成アルゴリズムでは、入力した形状に対して、自由度の高い動きを実現できる産業用腕型ロボットで表現可能な三次元曲線を生成した。アルゴリズムを適用した簡易的なオブジェの製作から、それらの曲線は実際に造形が可能ということが分かった。

造形物に生じる引張応力に対し最適化した積層パスの生成では、造形物の構造解析を行い、解析結果から得られる応力状態を元に、引張繊維適用範囲の定義、その積層パスの生成を行った。

構築した理論を適用した複雑形状の積層パスは、ロボットシミュレーションにより、作業環境を適切に設定することで造形が可能であることを確認した。

今後は、積層パス自動生成アルゴリズムの適用可能な形状パターンを増やし、さらに局所的な引張方向積層の構造的な有効性の検証を行う。再構築したアルゴリズムを用いた大型の樹脂構造物の製作を検討中である。

[参考文献]

- 1) URL:<https://www.smartbridgeamsterdam.com/>
- 2) URL:<https://olympics.com/tokyo-2020/ja/games/sustainability/podium>
- 3) 仲 遊人, 寺田 泰地, 加戸 啓太, 平沢 岳人: ロボットを用いた 3D プリンティングに関する研究 その 1 六軸を用いた積層造形、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp161-162、2021.9
- 4) 寺田 泰地, 仲 遊人, 加戸 啓太, 平沢 岳人: ロボットを用いた 3D プリンティングに関する研究 その 2 家具の造形、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp163-164、2021.9
- 5) 山田貴博, 高性能有限要素法, 丸善株式会社, 2007