

折り畳んだ後の領域を考慮した三次元物体の折り畳み手法

島津 貴行[†] 森口 昌樹^{††} 今井 桂子^{†††}[†] 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻

〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

^{††} 明治大学 先端数理科学インスティテュート

〒 164-8525 東京都中野区中野 4-21-1

^{†††} 中央大学理工学部情報工学科

〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

E-mail: †tshimadu@imai-lab.ise.chuo-u.ac.jp, ††moriguchi@meiji.ac.jp, †††imai@ise.chuo-u.ac.jp

1 はじめに

私たちの生活の中で、空間を効率良く利用するためにパイプ椅子のような折り畳める物体は数多く存在する。このような折り畳み可能な物体は、通常デザイナーのアイデアと多くの実験によって生まれ、誰でも折り畳み可能なものが作れるわけでは無い。そこで本研究では、家具のような板状の部品からなる三次元物体を入力とし、最適化問題を用いて折り畳み可能な形状を求め、3Dプリンタで折り畳み可能な物体を造形することを考える。

既存研究 [1] では、三次元物体と折り畳み方向を入力として、最適化問題を解くことによって折り畳み可能な形状を求めている。本研究では、入力に形状を折り畳んだ後の形状の占める領域を追加する。形状を決定する最適化問題において、ボクセル化を用いて、折り畳んだ後に占める領域に対するコストを追加することで、なるべくその領域内に収まる形状を求める。得られた形状を3Dプリンタで造形する際には、部品ごとに造形しても組み立てられるように形状を分解し、材料の使用量の削減や造形時間の短縮を目的とした手法を提案する。

2 三次元物体の折り畳み手法

ここでは既存手法 [1] での折り畳み可能な形状を求める手法を示す。入力を直方体で近似できる領域のメッシュの集合である三次元形状 O と、一つの折り畳み方向 \vec{d} とする。形状 O に対する操作はヒンジの挿入と部分的な縮小のみを許し、パーツどうしがぶつからないことを制約とする条件のもと、二つの操作にコストを設定し、最小コストの操作を出力とする。

[1] では、扱う形状の次元を下げる抽象化と、問題を小さくする分割をし、最適化問題に定式化することで折り畳み可能な形状を得ている。まず、入力が与えられたとき、直方体の処理は複雑かつ時間がかかるため、各直方体を長方形とする。折り畳み方向 \vec{d} により複数の直方体を一つの長方形とすることもある。これを抽象化という。各長方形をパッチ、パッチの集合を基盤と呼び、 m 個のパッチ集合である基盤を、 $P = \{p_i \mid i = 1, \dots, m\}$ と表す。また、 \vec{d} に対して垂直なものを底パッチ、それ以外を操作パッチと分類する。

ここで、折り畳むときに、ぶつかる可能性のあるパッチの集合を依存集合と定義する。これを用いて、 P を依存集合に分割する。また、パッチ p_i に対して行う操作を p_i の解 F_{p_i} とする。 F_{p_i} のコストは、 $\text{cost}(F_{p_i}) = \alpha N_h / \hat{N}_h + (1 - \alpha) R_s^2$ と表し、 N_h , \hat{N}_h はヒンジ挿入数と最大ヒンジ挿入数を、 R_s は縮小率を表す。 $\alpha \in [0, 1]$ は、パラメータ変数である。

- 底パッチを共有する操作パッチは同じ操作を行う。
- パッチどうしは互いに干渉しない。

以上の二つの制約を満たし、最小コストをとる操作が p_i の最適解 $F_{p_i}^*$ であり、各依存集合の解は、それが持つ各パッチの最適解の集合である。基盤の解を F とすると、 F は各依存集合の最適解の集合と表現できる。

基盤の最適解 F^* を求めるために、依存集合の最適解を求め依存集合どうしが干渉しない解の組合せを決める内部ループと、依存集合を折り畳む順序の最適化を行う外部ループを構築した入れ子型の最適化問題を解くことで、折り畳み可能な三次元形状を出力する。

3 提案手法

折り畳んだ後に物体が占める領域を考慮する手法と、効率の良い3Dプリンタでの造形手法を提案する。

[†]Takayuki SHIMAZU ^{††}Masaki MORIGUCHI ^{†††}Keiko IMAI
[†]Graduate School of Science and Engineering, Chuo University
^{††}Meiji Institute for Advanced Study of Mathematical Sciences, Meiji University
^{†††}Faculty of Science and Engineering, Chuo University

3.1 折り畳んだ後を考慮した折り畳み手法

本研究では、どのような形状に収めるかを指定することで、空間をより効率良く利用できるため、既存手法の入力に、直方体の領域を追加する。ボクセル化を用いて、この領域内に折り畳み後の形状が収まることを目標とする。

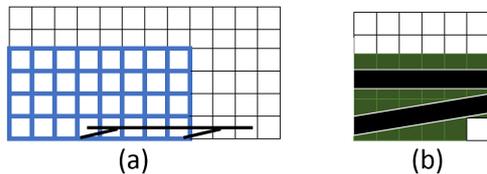


図 1. ボクセル化 (a) 入力領域とボクセル (b) サブボクセル

各依存集合を折り畳むとき、その依存集合が入力領域をいくら占め、どの程度逸脱しているかを離散的に評価するために、空間をボクセルに分割する。ボクセルにより、そのボクセルに物体が侵入しているかを判断し、サブボクセルで、そのボクセルにどの程度物体が占めているかを定量的に決定している。サブボクセルを作ることで、物体とボクセルの交差判定回数を減らし、計算時間を短縮できる。図 1(a) の格子はボクセルを、太線のボクセルは入力領域を表す。(b) は一つのボクセルが持つサブボクセルを表し、各ボクセルは同数のサブボクセルを持つ。(b) の黒い線分は物体の一部であり、塗りつぶされたサブボクセルは物体と交差するものである。一つの依存集合に対するコストを、各ボクセルが持つサブボクセル数に対して物体が占めるサブボクセル数の割合を、全てのボクセルについて和をとったものとする。ここでは、局所的に見てその依存集合が領域内に収まるのならば良い折り畳みとし、指定領域外のコストに領域内のコストの三倍の重みを設定する。

以上のように定義したコストを用いて、指定した領域内なるべく収まるような形状を生成する。既存手法の最適化問題での依存集合の折り畳み順序を決める外部ループでこのコストを追加し、最適化問題を解くことで、そのような形状を得る。

3.2 3D プリンタでの造形手法

折り畳み可能な形状を 3D プリンタで印刷し、造形時間の短縮とサポート材の使用量の削減を目的とする 3D プリンタ造形手法を提案する。

まず、折り畳み可能な形状を各部品を個別に造形しても組み立てられるような部品に分解し、サポート材の消費量削減のため、回転により部品を一つの平面上

に並べる。次に、各部品に対して凸包をとり多角形に近似し、この多角形の集合を入力として、印刷物が密集していると造形時間を短縮できることから、[2] を基にした bottom-left 法を用いて詰め込み問題を解き、部品の配置を決定する。

4 実行例

横 7.5cm× 縦 7.5cm× 高さ 15cm の椅子を表現する三次元形状と 3cm×7.5cm×15cm の収納領域を表す直方体を入力として実験したときの結果を図 2 に示す。

3D プリンタは、FDM 方式の Ultimaker3 Extended を利用し、ソフトウェアは Ultimaker Cura 3.1 である。(a) は、折り畳み可能な形状を分解したもので、(b) は、それを組み立てた物体である。そして (c) は、(b) を折り畳んだ後の状態である。造形時間は 27 時間 47 分で、サポート材消費量は 21g であり、既存手法では、それぞれ 72 時間 22 分、180g であった。

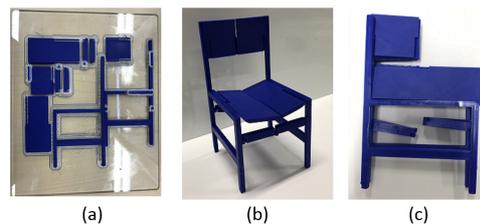


図 2. 出力結果 (a) 分解した部品 (b) 組み立てた物体 (c) 折り畳んだ後の物体

5 まとめ

提案手法により、指定した領域内なるべく収まるような形状を生成することができ、空間をより有効活用する折り畳み物体をデザインできると考えられる。また、3D プリンタ造形手法により、サポート材の消費量の削減と造形時間の短縮ができた。

今後の課題として、構造的に最適なヒンジ挿入位置や物体の部分的な縮小拡大を行うことで、組み立てたときに実際に利用しやすい形状にすることが挙げられる。

参考文献

- [1] H. Li, R. Hu, I. Alhashim, and H. Zhang, "Foldabilizing Furniture," In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2015*, Vol. 34, No. 4, pp. 1–12, 2015.
- [2] 梅谷 俊治, 今堀 慎治, "切出し・詰込み問題とその応用—(3) 多角形詰込み問題—," *オペレーションズ・リサーチ* 2005, Vol. 50, No. 6, pp. 403–408, 2005.