

物体をサポートとしても利用する複数物体の同時 3D プリント

鄭 秀煥 井尻 敬

芝浦工業大学工学部 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3 丁目 7-5

E-mail: al18073@shibaura-it.ac.jp, ijiri@shibaura-it.ac.jp

あらまし 積層型 3D プリントを用いた造形において、造形する物体がオーバーハング構造を持つ場合には、その下の空間を足場となるサポートで埋める必要がある。このサポートは造形後に除去・廃棄されるものであり、サポートの量をなるべく削減したいという要求がある。そこで我々は、複数物体を同時に造形することで、サポートを削減する手法を提案する。本研究では、プリントしたい物体が二つあり、片方は分割不可能であり、もう一方は分割可能である状況を仮定する。この下で、分割可能な物体を分割し、それをもう一方のサポートとして利用することで、全体のサポート量を削減する。特に本研究では、物体の分割方法および、分割した物体をサポート領域に配置する手法を提案する。提案手法の有用性を評価するため、既存のデータセットを利用した実験を実施した。結果、提案手法を利用すると、積層型 3D プリントによる造形においてサポート量を削減できることを確認した。一方、物体の分割に伴う必要材料量の増加などの理由から、全体の材料量の大幅な削減は難しいことも確認された。

キーワード 積層型 3D プリント, サポート削減

1. はじめに

積層型 3D プリントによる造形において、造形する物体が空中にせり出した構造（オーバーハング）を持つ場合、その下の空間を造形の際に足場となるサポートで埋める必要がある。このサポートは造形後に除去されるため、サポートの量をなるべく減らしたいという要求がある。

積層型 3D プリントによる造形において、サポート量を削減する手法が研究されている。サポートの形状を工夫する手法として、サポートに低密度な木構造を利用する Clever support[1]が知られる。しかし、この手法は造形時の安定性に課題がある。一方で、物体を分割する事でサポートを削減する手法も研究されている。Hu らは、物体をサポートが不要なピラミッド状の部分パーツに分割する手法を提案した[2]。Vanek らは、物体を空洞化した後に分割し、それらを密にパッキングすることで、サポート量・材料量・造形時間を削減した[3]。しかし、これらの手法は物体の分割を前提とするため、一体成形によって機能が担保される工具や、仕上がり品質が求められる芸術作品の造形には適さない場合がある。

そこで本研究では、複数の物体を同時に造形することで、サポート量を削減する手法を提案する。具体的には、主要オブジェクトと補助オブジェクトという二つのプリント対象が存在する状況を仮定する。ここで、主要オブジェクトは分割不可能な物体であり、補助オブジェクトは分割可能な物体である。またこれらの物体には積層方向が指定されているものとする。この状況の下、本研究では、補助オブジェクトを分割し、これを主要オブジェクトのサポートとして利用することで、二つの物体を同時に造形しつつ、全体の材料量を削減する。図 1 に提案手法による造形例を示す。二つの物体を別々に造形する通常の手法（図 1a）に対し、提案手法では補助オブジェクトが分割され主要オブジェクトのサポートとして利用される（図 1b）。

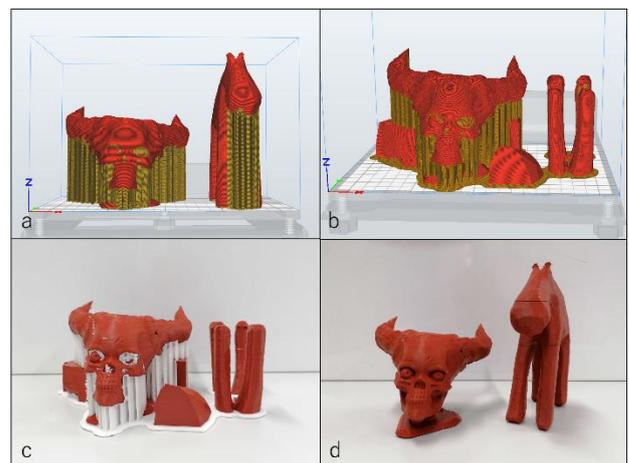


図 1. 提案手法による 3D プリント例。二つのオブジェクトを造形する際、通常は二つを個別に配置し、造形する (a)。提案手法では、主要オブジェクトのサポート領域を埋めるように補助オブジェクトを分割・配置し (b)、造形した後 (c)、補助オブジェクトを組み立てる (d)。

2. 提案手法

2.1. パッキングアルゴリズム

提案手法の入力は主要オブジェクト、補助オブジェクト、および、補助オブジェクトの最大分割数 K_{max} である。出力は、補助オブジェクトをパーツに分割し、すべてのパーツを主要オブジェクトと同じ空間に配置した 3 次元モデルである。

我々は、主要オブジェクトのオーバーハングから、その下のサポートが必要な領域（以下、サポート領域）を求め、この領域内に補助オブジェクトを配置する。具体的には、補助オブジェクトを k 個のパーツに分割し、以下のコスト関数を最小化するように、これらを配置する、

$$V(S(M \cup P_k)), \quad (1)$$

ここで、 M は主要オブジェクト、 U は 3 次元物体の論

理和演算, P_k は3次元空間に配置した k 個のパーツの論理和(後述する)である. また, $S(\cdot)$ は3次元物体のサポート領域を求める関数, $V(\cdot)$ は3次元物体の体積を求める関数である. 上述の通り P_k は分割された補助オブジェクトの k 個のパーツの論理和であり,

$$P_k = T(p_1, \mathbf{t}_1, \mathbf{R}_1) \cup \dots \cup T(p_k, \mathbf{t}_k, \mathbf{R}_k), \quad (2)$$

と書ける. ただし, $T(p_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{R}_i)$ は, i 番目のパーツ p_i に並進ベクトル \mathbf{t}_i と回転行列 \mathbf{R}_i による剛体変換を適用したものである. 式(1)に示すコスト関数を最小化する各パーツの剛体変換 $(\mathbf{t}_i, \mathbf{R}_i)$ を求めることで, 全体のサポート領域が最も小さくなる最適な配置を取得できる.

ここで, 補助オブジェクトの最適な分割数は不明である. そこで本研究では, 分割数 k を1から K_{max} まで1ずつ増加させ, 各分割数にて最適な配置を計算し, 最もコスト関数の値が小さい配置を出力する.

2.2. 補助オブジェクトのパーツ分割

補助オブジェクトの形状と分割数 k が与えられると, 我々は以下のトップダウンな手順で補助オブジェクトを分割する. まず, 補助オブジェクト全体を内包するバウンディングボックスを計算し, その最長辺を2等分する平面により補助オブジェクトを2分割する. 続いて, 分割されたパーツのうち体積が最も大きいパーツに対し, 同様の方法を適用することで, これを2分割する. この処理を $k-1$ 回繰り返すことで, k 個のパーツを取得する(図2).

2.3. パーツの配置

本研究では, 式(1)に示すコスト関数を最小化するパーツ配置の近似解を得るため貪欲法を適用する. 具体的には, 体積が大きい順にパーツ p_i を取り出し, サポート領域の体積が最も小さくなる位置にこれを配置していく. i 番目のパーツ p_i の剛体変換 $(\mathbf{t}_i, \mathbf{R}_i)$ は, 下式を最大化することで求められる,

$$V(S(M \cup P_{i-1}) \cap T(p_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{R}_i)) - V(S(T(p_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{R}_i)) \ominus (M \cup P_{i-1})). \quad (3)$$

ただし, \cap は論理積演算を, \ominus は論理差演算を表し, P_0 は空集合とする. この式の第1項は現在のサポート領域と p_i との重なりを大きくする効果を持つ. また, 第2項は p_i 自体のサポート領域を小さくする為のものである.

ここで, 連続した空間でパーツの最適な剛体変換を推定するのは容易ではない. そこで本研究では, オブジェクトおよび空間をボクセル状に離散化し探索範囲を限定する(図3). また, 各パーツの回転を, 積層方向が変化しないように, 鉛直方向を軸とした90度単位の回転と, 上下が反転する180度回転のみに限定する. この範囲で全探索することで, 式(3)を最大化するパーツの配置を計算する.

3. 評価実験

提案手法のサポート量削減効果を確認するために実験を行った. まず, 3Dプリンタによる造形を目的として作られた3Dモデルのデータセットである, Thingi10K[4]から, 主要オブジェクトと補助オブジェクトを12組選択した. 主要オブジェクトはサポート領域が大きい500個のモデルからランダムに選択し, 補助オブジェクトは主要オブジェクトのサポート領域



図2: 補助オブジェクト分割の様子

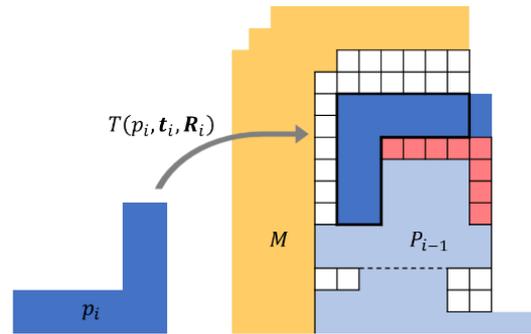


図3: 補助オブジェクト p_i の配置計算. 我々は, オブジェクトおよび空間をボクセル上に離散化し, 全探索することで最適なパーツの配置を推定する. 式(3)の第1項は太枠部分の体積に, 第2項は赤色部分の体積に相当.

の1.5倍から0.5倍の体積を持つモデルをランダムに選択した.

この12組に対して, 提案手法により補助オブジェクトの分割と配置を行い, 市販のソフトによりサポートを生成した後, サポート削減効果を算出した. 補助オブジェクトの最大分割数 K_{max} は6とした. 図4に配置結果の一部を示す. ここで, 積層型3Dプリンタの代表的な造形方式である熱溶解方式と光造形方式では異なる形状のサポートが利用される. 熱溶解方式を想定したサポート生成には, ソフトウェア Qidi Print を利用し, 光造形を想定したサポート生成では CHITUBOX64 を利用した. また, 熱溶解方式については, 物体内の充填率20%と100%の場合について計測を行った.

実験結果を表1に示す. 左から熱溶解方式(充填率20%), 熱溶解方式(充填率100%), 光造形方式を仮定しサポート生成を行った結果である. また, 縦軸は, 二つの物体を個別に造形した場合に対する, 提案手法を利用した場合の, 「サポート量の割合」「非サポート量の割合」「全体の材料量の割合」「造形時間の割合」である. ただし, 12組の内, 配置に失敗した1組と, 補助オブジェクトが取り外し不可能な位置に配置された1組を計算から除外した.

この結果より, 二つの物体を別々に造形する場合に比べ, 提案手法を利用することで, サポート量を削減できることが分かった. 一方, 全体の材料削減

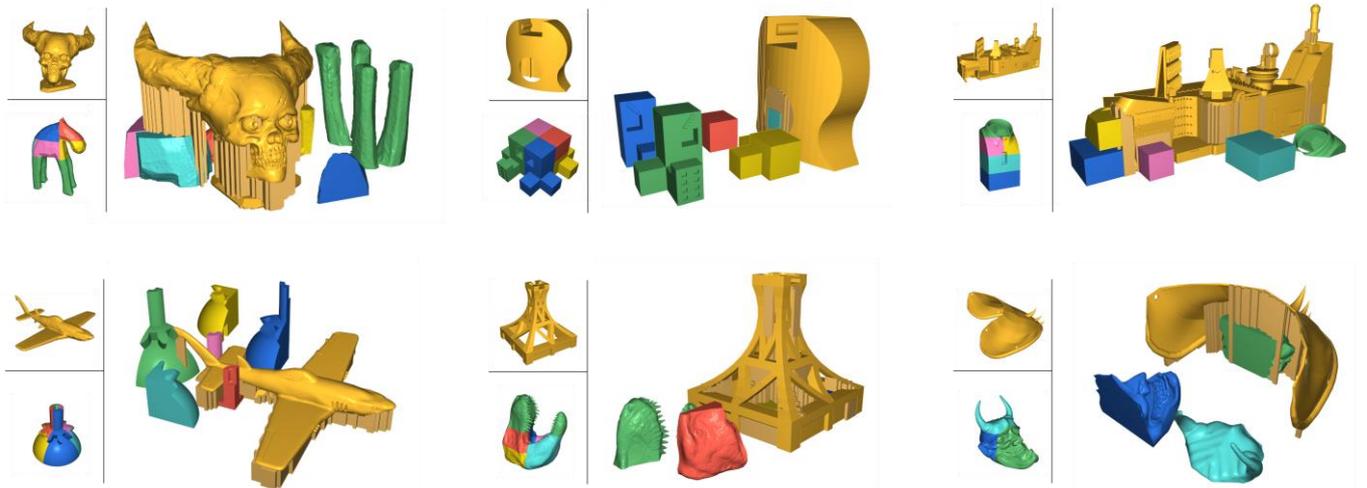


図 4: 提案手法により主要オブジェクトと補助オブジェクトをパッキングした例. 各パネルにおいて左上が主要オブジェクト, 左下が補助オブジェクト, 右がパッキング結果.

表 1: 実験結果.

	熱溶解 20%	熱溶解 100%	光造形
サポート量	74.7%	78.2%	79.4%
非サポート量	105.6%	99.9%	100.0%
全体 マテリアル量	99.2%	97.7%	99.2%
造形時間	99.7%	97.6%	96.1%

減効果は非常に小さいことも分かる. この理由は二つ考えられる. 一つ目は, オブジェクト自体のマテリアル量が, サポートのマテリアル量に比べ非常に多いためである. また二つ目は, 充填率の低い熱溶解方式特有の理由であるが, パーツ分割に伴い, パーツの外殻の生成が必要になり, かえって必要なマテリアルが増加してしまったためである.

4. まとめと展望

本研究では, 二つの物体を同時に印刷する状況を仮定し, 一方の物体をもう一方のサポートとして利用することでサポートを削減する手法を提案した. 提案手法の効果を確認するため, 複数の3次元モデルの組に対して提案手法を適用し, サポート削減量や全体のマテリアル削減量を計測した. 結果, 提案手法は, 熱溶解方式と光造形方式において, サポート量を削減できることを確認した. 一方, パーツ分割に伴う必要マテリアル量の増加などの理由から, 提案手法では, 全体マテリアル量の大幅な削減は難しいことも確認された.

本研究の将来課題の一つは, 最適なパーツ分割法の実現である. 本研究では, バウンディングボックスを2等分するという単純な分割を利用した. より多様な分割法を適用することで, より良いパーツ配置を行えると考えている. また, 本研究では, 物体が二つの場合のみを扱ったが, 今後, 複数の主要オブジェクト

がある場合や, 複数の補助オブジェクトがある場合など, より複雑な組み合わせについても取り組みたい.

文献

- [1] Juraj Vanek, J A Garcia Galicia, and Bedrich Benes: "Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication", Computer Graphics Forum, 33, 5, pp.117-125, (July 2014).
- [2] Ruizhen Hu, Honghua Li, Hao Zhang, and Daniel Cohen-Or: "Approximate pyramidal shape decomposition", ACM Transactions on Graphics, 33, 6, pp.1-12, (November 2014).
- [3] Juraj Vanek, J A Garcia Galicia, Bedrich Benes, R Mzch, Nathan Aaron Carr, Ondrej Stava, and Gavin S P Miller: "PackMerger: A 3D Print Volume Optimizer", Computer Graphics Forum, 33, 6, pp.322-332, (September 2014).
- [4] Qingnan Zhou, and Alec Jacobson: "Thing10K: A Dataset of 10,000 3D-Printing Models", arXiv preprint arXiv:1605.04797, (July 2016).