



## Prévost, R. et al : Make It Stand : Balancing Shapes for 3D Fabrication

ACM Transactions on Graphics 32 (4)

## CG 分野でのモノづくり研究

三次元プリンタに代表されるコンピュータで制御される工作機械が身近になるにしたがって、デジタル表現のメディアが、音声や画像だけでなく、実在の物へと幅を広げている。しかしながら、実在の物は、物理法則によって支配されるため、たとえば折れたり倒れたりしないように、物理を考慮に入れて形を設計しなければいけない。そうした中で、三次元印刷された物体の強度を上げたり、物体の変形や色を忠実に実現したりという、さまざまな要求に対して計算機を用いた設計方法がコンピュータ・グラフィックスの研究分野で積極的に研究されている。コンピュータ・グラフィックスの研究というと、字面からは計算によって画像や動画を合成する学問であるという印象を受けるが、もはや研究対象はディスプレイ上のピクセルにとどまらず実世界のモノづくりへと範囲を広げている。本稿では、そんな三次元プリンティング向けの設計支援システム研究の先駆けとなった論文の1つを紹介する。

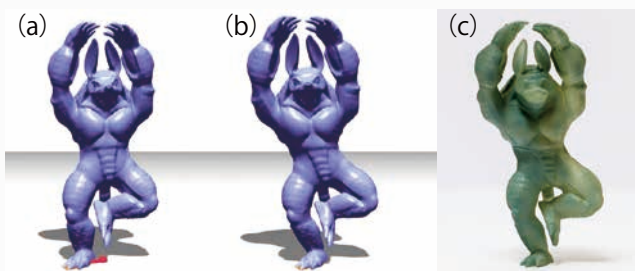


図-1 (a) 自立しない形状, (b) 自立させるように外形を最適化した結果, (c) 3D プリントされた形状 [Prévost et al. から引用]

## 姿勢安定性と最適化

この論文は、三次元プリントされた物体が床の上で安定して立つように、形状を変形させるような技術を提案している。たとえば、変わった姿勢をしたキャラクターはバランスを崩して自立しないことが多いが、キャラクターの内部の空洞の形状を変えたり、姿勢を微妙に変えたりすることで、重たい台座に固定する必要なく自立させることができる (図-1)。

変形が無視できるような硬い物体を、平らな床の上においたときにそれが安定するためには、物体の重心位置と、床との接触点の位置関係が重要である。接触点の凸包を計算したときに、その凸包の中に物体の重心位置から床に下ろした垂線の足が含まれる場合は、物体は自立して立つことができる。そこで、物体の重心位置を凸包に入るように形状を変更すればよい (図-2)。

重心を望みの位置にするように形状を変更する方法は多々あるが、この論文では (1) 物体の内部の変更, (2) 物体表面形状の変更という2種類の方法について提案している。物体の内部の変更で



図-2 三次元物体を床に安定に立たせるための条件



は、物体の内部の空洞の形を制御することによって重心を変えるものだが、空洞の形は非常に自由度が高く扱いづらい。そこでこの論文では、空間を格子を用いて離散化するボクセル方式の形状表現を用いている。物体の内部だけを変更して重心を動かせる範囲には限界がある。そこで、物体の表面形状も必要に応じて変更する。一般的に物体の表面形状は非常に自由度が高いので、この論文ではユーザに数個の点を物体内部に入力させ、その点周りの剛体変形に基づいて物体全体を滑らかに変形させる線形ブレンドスキニングという技術を用いて変形させる。

重心の位置が凸包に収まりつつ、形状の差を最小化するように目的関数を定めて、最急降下法にて最適化することで望みの形状を得ることができる。この最適化の処理は高速で、最適化された形状をユーザが対話的に逐次編集することも可能である。著者らはYouTubeに解説動画をアップロードしているので、興味を持たれた読者はぜひとも参考にしてほしい：

[https://www.youtube.com/watch?v=\\_drZksLRx94](https://www.youtube.com/watch?v=_drZksLRx94)

## その後の研究に与えた影響

三次元プリンタは、任意の三次元の形状を、さほど大きな制約なしに出力できるので、オリジナルな一品物を作るのに適している。三次元プリンタの種類によっては、任意の色を印刷することができたり、弾性のある材料を使ったり、性質の異なる材料を任意の割合で混ぜることができ、その表現の自由度は非常に大きい。三次元プリントさ

れた物にいろいろと機能を持たせるべく、たとえば力をかけても壊れないようにしたり、コマのように回転しやすくしたり、ロボットように関節をつけて動くようにしたりなど、さまざまな物理を考慮した設計支援の研究がなされている。これらの研究では、ユーザが対話的に設計に参加できるインタフェースが提案されていることが多く、ユーザの創造を妨げないよう手法が工夫されている。筆者らも、三次元プリンタを使って任意の形状をした笛を、音響シミュレーションを元に対話的に作る研究や、よく飛ぶ手投げ飛行機を対話的に設計するシステムなどを提案している。

生産技術の発達によって同じ物を大量に自動で製造することが可能になったが、高度にカスタマイズされた物を人間の介在なしに自動で作れるようになる日はまだまだ遠いだろう。製造がデジタル化され自動化されたからといって、その製造のために使われるデジタル形状データを自動的に生成することは困難であるからだ。設計には使いやすさや、見た目の良し悪し、製造のしやすさなど、定量化の難しいさまざまな要因を考慮しなければならない。計算機が人間の設計を賢くサポートして、自由に人間の意図を反映させられるようにするためには、まだまだ課題が多く残されている。

(2020年1月9日受付)

.....

梅谷信行 n.umetani@gmail.com

2012年東京大学情報理工学系研究科博士後期課程修了。オートデスク研究所の主任研究員などを経て、現在、東京大学情報理工学系研究科特任講師。博士(コンピュータ科学)。