

WeightPrint: 造形物の重さが設定できる 3D プリント手法の基礎検討

小林 颯^{†1} 山岡 潤一^{†2} 笥 康明^{†1}

概要: 3D プリンタで出力した造形物は、形状は意図通りに出力されるが、そのモデルの重さに関しては考慮されることが少ない。本研究では、形状に加えて重さを指定した 3D モデリングおよび造形手法 WeightPrint を提案する。ユーザはソフトウェア上でモデルをインポートし、重さを指定することで、自動的に錘が入る空洞を生成し、指定した重さの造形物を出力することができる。本稿ではソフトウェアの設計および実装と、本システムを用いて実際に出力し、展示を行った際の反応および今後の展望について述べる。

WeightPrint: A Basic Study on a 3D Printing Method to Create Weight-Controlled Objects

HAYATE KOBAYASHI^{†1} JUNICHI YAMAOKA^{†2}
YASUAKI KAKEHI^{†1}

Abstract: While 3D printers can create objects with desired size and shapes, weight of the printed objects is seldom considered in that materializing process. However, weight of mockups is also one of important elements for prototyping. In our research, we propose a method that users can set weight of printed objects by installing additional weights and making cavities inside of the model to adjust its total weight. By using this system, we have created multiple examples including cubes with simulated weight of different materials, and models of fruits with actual size and weight. Additionally, we reported reactions and comments of people who grabbed the weight-controlled objects.

1. はじめに

昨今、3D プリンタやレーザーカッターといったデジタル工作機械によって、簡単に実体のあるオブジェクトを設計・制作できる環境が整備されてきた。Neil Gershenfeld は、デジタル・ファブリケーションがより身近になり、今後より多くの人々がパーソナルファブリケーションに興じるようになると論じている[1]。また、製品開発のプロセスにおいてもラピッドプロトタイピングの重要性が指摘されている[2]。

Dan Saffer は著書にて「元祖 Palm Pilot のデザイナーであるジェフ・ホーキンスは、製品にふさわしい大きさ、形、重さが決まるまで、様々な小さい木片を持ち歩いたことで有名である」と述べている [3]。この言葉が示すように、モックアップを製作する際には、大きさや形だけではなく、重さなど、それを手にした時の印象も重要な要素となる。

このような背景の中で、従来の 3D プリント手法を考えると、ユーザは CAD を用いて形状およびサイズを指定し、さらに必要があれば強度や弾力性を指定することができる [4][5]。しかし、プロトタイピングにおいて印象を形成する重要な要素である重さに関しては、形状に対応するフィラメントの量や材質に依存しており積極的に考慮されてこな

かった。例えば、発売予定のプロダクトの持ち心地や着ける心地をイメージするために、その形状を有したモデルを 3D プリンタで出力してみるということはしばしば行われる。しかし、その造形物の重さは実際のプロダクトとは異なるため、現状では手に持った際の印象をイメージ・共有することは難しい。フィラメントの材質に関わらず形状と重さを独立して設計できるようにするために、今回筆者らは、錘を用いて所望の重さに合わせることが可能な 3D プリント手法 WeightPrint を提案する (図 1)。そして、同手法を用いて、出力したい重さに応じて造形物のモデリングデータを生成し、3D プリンタで出力後、展示を行った。

以下、本稿では関連研究について改めてまとめた後に、



図 1 WeightPrint
Figure 1 WeightPrint.

^{†1} 慶應義塾大学環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University
^{†2} 慶應義塾大学 SFC 研究所 / 日本学術振興会
Keio Research Institute at SFC / the Japan Society for the Promotion of Science

WeightPrint の概要、実装および展示を行った際のフィードバックについて報告する。

2. 関連研究

近年では、3D プリンタのためのフィラメントの選択肢も増え、フィラメントの材質・色のみならず、強度や密度の選択肢も増えてきている。デジタル工作機械およびマテリアルの進化に加えて、ソフトウェアの制御を通して、モデルの内部構造を変えることで、弾力性や強度などの特性を調整する取り組みも行われている。

3D モデルの弾力性を制御する例として、Schumacher らは、3D モデルにおける微細構造を設計することにより、出力後、造形物の弾力を局所的に変化させる手法を提案した [4]。また、Peng らの A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive Objects [5]では、3D モデルを階層化し、階層ごとにレーザーカットした布を貼り合わせ、柔らかさを持ったオブジェクトの出力を実現した。Bäcker らの Spin-It [6]は、造形物をコマのように回転して自立するように、オブジェクトの重心を計算して出力するソフトウェアである。このように、3D オブジェクトの内部構造の設計により、造形物の物質特性を制御するというアプローチが多く行われているが、造形物の重さを考慮した取り組みは多くない。

別に関連する分野として、VR (Virtual Reality) 等の分野では重さの変化するインタフェースの研究が行われている。Niiyama らの Weight/Volume Changing UI は、箱に取り付けられたチューブを通じて、液体金属を箱内部へと流し込み、液量によって、インタラクティブに重量を変化させる装置を提案した [7]。機構を通じて、マツ材、水、アルミニウムの重量を動的に再現することができる。また、應和らの INVISIBLE -影を追う者- [8]では、背中のタンクと手元の掃除機型デバイス間で水を流すことで、掃除機でバーチャルにキャラクターを吸い取った際の重みを提示する。南澤らの Gravity Grabber [9]は、箱などの物を持った状態で、指先に装着したデバイスのベルトを巻き取ることで、指にバーチャルなオブジェクトの質量を感じさせるという触覚デバイスである。これらはオブジェクトあるいは指に特殊な電氣的・機械的なデバイスをケーブル等を介して接続する必要がある。これに対し、本研究ではラピッドプロトタイピングという観点から、造形物に重量を付与する 3D プリント手法を提案する。

3. システム

3.1 システム概要

筆者らが提案するシステムでは、ユーザは 3D プリンタを用いてモデルを出力する際に、所望の重さを指定できる環境の構築を目的とする。具体的に、今回提案する手法は以下のような手続きを踏む。まずユーザは、一般的な CAD

ソフトウェアを用いてモデルの形状を設計する。その後、ソフトウェア上のアルゴリズムにより、造形に使用するフィラメントの密度を考慮した上で、造形物の内部に空洞および錘を入れるための空間が生成される。生成されたモデルを 3D プリンタで出力した後にユーザが、システムの指定する重さの錘を造形物の内部に組み込むことで、造形物と錘の重さの合計がユーザの予め指定した重さに合うという仕組みである。

将来的には自動でモデルが生成される環境を目指す。今回は基本的な検討として、ユーザの手動での作業とシステムによる空洞のサイズ・位置の算出を組み合わせた方法で上記の造形プロセスを実現した。以下に、本システムにおいて、ユーザが指定した重さに応じて、錘と同じサイズの空洞を生成し、残り必要な空洞の体積とサイズを表示するソフトウェア、3D モデルを出力するためのハードウェア、及びそれらを統合した実装について述べる。

3.2 ソフトウェア設計

まず、ユーザは造形に用いる 3D モデルを CAD 上で上部・下部に二分割し、それぞれ stl 形式のファイルとして書き出す。また、使用するフィラメントマテリアルの密度を算出するために、一辺 2cm の立方体を出力し、秤でその重さを測定してマテリアルの密度(g/mm^3)を求める。

Grasshopper 上のソフトウェア (図 2) に、この stl ファイルと密度の値を入力すると、後に詳述するアルゴリズムによって、錘を入れるための空洞を生成し、その左右・手前・奥に重さを調整するための空洞が生成される。なお、今回は簡単のために、出力するオブジェクトの元のモデルには内部にマテリアルの詰まった十分な空間があることを前提とする。

今回は、モデルの内部に格納するために、1g・2g・5g・10g・20g・50g・100g・200g・500g の計 9 種類の円柱型の錘を用意した。ユーザは stl ファイルを開き、密度の値を入力した後で、格納可能な錘のサイズを確認する。これは、ユーザがソフトウェア上で錘の種類を選択すると、3D モデルと共に錘の形状のモデルが画面に表示され、ユーザは、

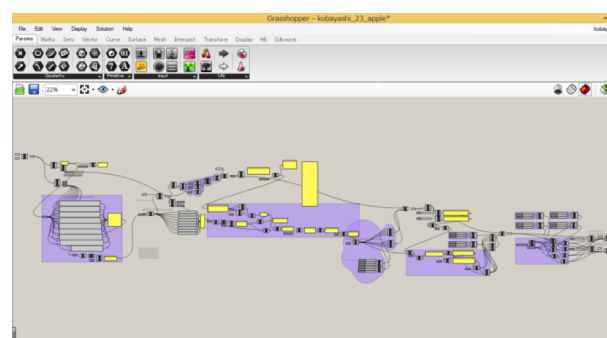


図 2 WeightPrint のプログラムを起動した様子
 Figure 2 A Program of WeightPrint.

錘がはみ出さないかなど格納の状態を確認することができる。さらに、システムはその錘を格納した際の出力可能な最大の重さ(g)を画面に表示する。この最大の重さとは、利用する錘の重さと錘以外の部分をフィラメントマテリアルで埋めた際の重さの合計で算出される。現在の実装では、錘は分割されたオブジェクトの断面の中央に配置されるようになっているが、将来的にはユーザがインタラクティブに錘の位置を調整できるようにしたいと考えている。

ユーザが最終的に用いる錘と最終的に目指す造形物の重量を決定すると、モデルにその錘を格納するための空洞が空けられる。さらに、上述のとおり今回ユーザが選べる錘の重さは離散的なため、最終的な重さはモデルにさらなる空洞を作ることによって調整する。空洞の位置は、図3に示す。この図において、青色の箇所が左右の空洞、赤色の箇所が手前・奥の空洞、黄色の箇所が突起・突起を埋める穴である(図3)。

ソフトウェア上で、以下のアルゴリズムに基づき、左右の空洞のサイズが自動で算出される。

まず、最終的に出力したい重さを $W0(g)$ とする。次に、ユーザが指定した錘の種類に応じて、錘を格納するための空洞を作ったモデルの体積から、そのモデルを出力した際の想定重さ $W1(g)$ を算出する。 $W1(g)$ に錘の重さ $W2(g)$ を加えた重量から $W0(g)$ を引いた重量分 $(W1+W2-W0)(g)$ だけ、空洞を空ける必要がある。また、この重量とフィラメントの密度から最終的に空洞に必要な体積 $V(mm^3)$ を求めることができる。

今回の実装では、以降の流れはすべてユーザが手動で行う。まず、ユーザはモデルの中に空洞を表す直方体を配置し、Number Slider コンポーネントを用いて、モデルからはみ出さない位置、サイズ(幅、奥行き、高さ)に調整する。この際、3D プリントの簡単のために空洞用の直方体の一部はモデルの分割面に交わっている必要がある。さらに、その直方体の体積だけでは必要な空洞の体積 V に満たない場合には、新たに別の直方体を配置して空洞部分を追加することができる。必要な個数・サイズの空洞に対応する直方体をモデル内に配置した後、3D モデルから生成した直方体部分を減算することで、中心部の錘格納部分と、その周りの空洞を含む 3D モデルが出来上がる(図4)。この際手動ながら、複数の空洞部分の位置や大きさを揃えるなどして、

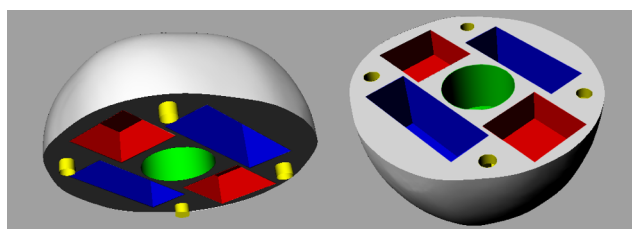


図3 空洞が生成された 3D モデル
Figure 3 3D-Model with cavities.

重心の位置を保つなどの工夫も可能である。

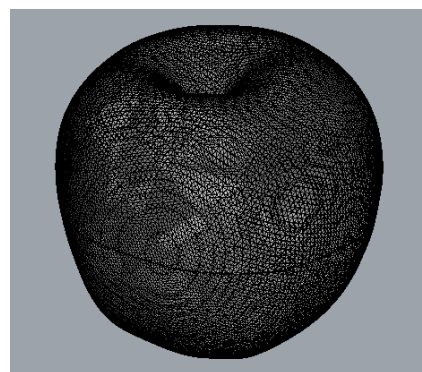


図4 ソフトウェアを通じて生成された 3D モデル
Figure 4 3D-Model generated using software.

3.3 造形物の出力方法

3D プリンタ (Stratasys 社製 uPrint SE) 専用ソフトウェア (Stratasys 社製 catalyst EX) を用いる。積層ピッチを 0.0100 に、モデル部の中埋め方法をソリッドに、サポート部の中埋め方法を最小限度に、STL 単位をミリメートルに設定し、バックを追加する。モデルの中埋め方法をソリッドにして設定を行うと、密 (100% 充填されている状態) の 3D モデルデータが生成されるため、ソフトウェア上で計算した重量と合致する造形物が出力できる(図5)。

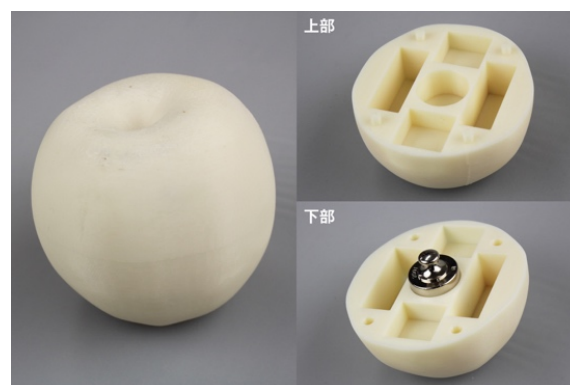


図5 3D プリンタを通じて出力された造形物
Figure 5 3D-printed Object.

4. 実装と展示の様子

4.1 実装と出力結果

今回実装した WeightPrint は、コンピュータ (Microsoft Windows 8.1 Pro)、ソフトウェア (RhinoCeros, Grasshopper)、3D プリンタ (Stratasys 社製 uPrint SE)、3D プリンタ用フィラメント (uPrint SE 専用プラスチック製モデル・サポート材)、錘 (東京硝子機械社製 上皿天びん用分銅セット) から構成される。

出力のサンプルとして、2 種類の果物、異なる素材の比重でシミュレーションした重量が反映された 3 種類の立方

体を出力した。具体的に、出力した造形物の内容は、りんご(340g)、みかん(M サイズ・120g)、ヒノキの比重を再現した立方体(51g)、プラスチックの比重を再現した立方体(162g)、コンクリートの比重を再現した立方体(287g)である。立方体は出力可能な重量の範囲を考慮し、サイズは全て 5 cm³とした。

実際の出力オブジェクトの重量とシステムに指定した重量の誤差は次の通りであった。りんごは+12g、みかんは+1g、ヒノキの比重を再現した立方体は 0g、プラスチックの比重を再現した立方体は+4g、コンクリートの比重を再現した立方体は 0g であった。幾つかの造形物の重量に誤差が生じた原因として、現用する 3D プリンタ上で機能するフィラメントの密度(g/mm³)を算出時の誤差が挙げられる。

4.2 展示の様子

本研究は、慶應義塾大学 SFC Open Research Forum 2015 (2015 年 11 月 20-21 日、東京ミッドタウンホール) にてシステムおよび造形物のデモ展示を行った(図 6)。10 代から 50 代までの体験者がブースに訪れ、造形物を自由に把持できる状態で体験した。体験者は、造形物に対して、「本物っぽい」「りんごって、こんな重かった(軽かった) っけ？」などと述べており、重さを考慮した造形物がリアリティをもたらし、また物の重さを意識するきっかけになったと考えられることもできる。また、重さだけでなく、重心の位置も合うとよりリアリティが向上するのではないかという意見もあった。これに関しては今後、錘を入れる位置、空洞を作る位置を考慮することで実現したい。



図 6 展示の様子

Figure 6 Exhibiting WeightPrint.

応用の見通しとして、体験者からは、重さの神経衰弱ゲーム、本物の重さを当てるゲームなど、重さとサイズを利用したエデュテインメントツールとしての可能性の提案があった。また、建築関係の仕事に従事する体験者からは、風圧に対する建築模型の耐久シミュレーションに有用との意見を得た。上述した新しい製品開発のためのプロトタイプ

ピングツールとしての応用に加えて、これらのアイディアも具現化してみたい。

5. まとめと今後の展望

本稿では 3D モデル内部に錘サイズの空洞と左右・手前・奥に空洞を生成し、任意の重さの造形物が出力できるツール WeightPrint について述べた。本システムを用いて、実際に重さを考慮した造形物を出力したところ、多少の誤差が生じたが、ほぼ設定した重さに近い重さの造形物が出力できた。この誤差を減らすことは今後の課題である。また展示を行った結果、多くの今後の応用性に関するフィードバックを得ることができた。

また今回の実装では、複雑な形状のオブジェクトを扱う場合に、内部に錘を格納するのに十分な空間が確保できないケースがあった。今後は、錘がはみ出したとしても、最終的な重さの正確さを重要視したいなどのニーズがある場合には、対応する方法を検討したい。また、オブジェクトの分割位置、錘の位置、調整用空洞の位置・サイズを自動的に最適化するための手法や、重りをプリンティング中に自動的に格納するハードウェアについても検討する。さらに、マルチマテリアル対応の 3D プリンタを用いて、金属製のフィラメントや他のマテリアルを用いることで出力できる重さの範囲を拡張したい。また先述のように、モデルの重心位置の制御も検討課題である。

また、現在は重さの設定はソフトウェア上で数値入力しているが、実際の物の重さを設定値として取り入れる方法も考えられる。例えば台座にユーザが出力したい物を載せ、3D スキャナを通して形状をスキャンする際に、台座に仕込まれた重量センサによって重さを測ることで、形状と重さ両方のコピー&ペーストできる環境が実現できる。

さらに、出力後に造形物の重さを変えられる機能の開発も方向性の一つである。本来は 120g であった M サイズのみかんを再現した造形物に対して、あえて錘を軽いものに入れ替えることで、約 80g の S サイズのみかんの重さを表現できる。このように、錘の入れ替えが可能な機構を作ることで、プロトタイプング中での試行錯誤を可能にするシステム設計も考えていきたい。

謝辞 本研究は一部、科学技術復興機構戦略的創造研究支援事業 CREST の支援を受けて行った。

参考文献

- 1) Neil Gershenfeld, 田中 浩也, 糸川 洋: Fab — パーソナルコンピュータからパーソナルファブ리케이션へ, オライリージャパン(2012)
- 2) 奥出 直人: デザイン思考の道具箱 — イノベーションを生

む会社のつくり方, 早川書房 (2007)

- 3) Dan Saffer, 吉岡 いずみ: インタラクションデザインの教科書, 毎日コミュニケーションズ(2008)
- 4) Christian Schumacher, Bernd Bickel, Jan Rys, Steve Marschner, Chiara Daraio, Markus Gross: Microstructures to Control Elasticity in 3D Printing, ACM SIGGRAPH 2015, (2015).
- 5) Huaishu Peng, Jennifer Mankoff, Scott E. Hudson, Jim McCann: A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive Objects, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) 2015, (2015)
- 6) Moritz Bächer, Emily Whiting, Bernd Bickel, and Olga Sorkine-Hornung. 2014. Spin-it: optimizing moment of inertia for spinnable objects. ACM Trans. Graph. 33, 4, Article 96 (July 2014)
- 7) Ryuma Niiyama, Lining Yao, Hiroshi Ishii: Weight and Volume Changing Device with Liquid Metal Transfer, TEI 2014, (2014)
- 8) 應和 春香, 佐賀野 正行, 吉村 康弘, 小村 仁美, 山崎 仁之, 渡邊 大輔, 仲野 嘉信, 白澤 卓, 辻村 壮史, 川嶋 賢二, 福嶋 昌子, 井村 誠孝, 千原 國宏: INVISIBLE –影を追う者-, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 コンテンツ論文 Vol.15, No.3, 2010, (2010)
- 9) Kouta Minamizawa, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi: "Wearable Haptic Display to Present Gravity Sensation - Preliminary Observations and Device Design", in Proc. 2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WorldHaptics 2007), pp. 133-138, Tsukuba, Japan (2007.3), 10 Pages