

## 特集 ■ 3D プリンタと VR

## 3D プリンタによる質感・現象の立体表現



藤木 淳 科学技術振興機構 / 東京藝術大学

Fujiki Jun

## 1. はじめに

現在、著者は様々なアプローチで現実の質感・現象を対象とした立体表現研究を進めている。単一素材で様々な質感・現象を鑑賞者に想起させることができれば、表現の幅が広がり立体を用いた豊かなコミュニケーションが展開されることを期待している。

3D プリンタの登場により、手作業もしくは他の機械では膨大な時間を要す立体表現が短時間で造形可能となった。もちろん、3D プリンタでも難しい表現はある。3D プリンタの造形法や材料にもよるが、例えば、繊細な構造を持つ立体物は、サポート材（中空に位置する部材を造形するための支えとなる部材）を、造形完了後に除去する際に、最終的に得られる造形物が破損したり変形したり、このサポート材が細部に詰まったりすることがある。しかし、そのような欠点を差し引いても、立体の内部の造形を1回の施行で出力できることは他の造形機械ではできなかったことであり、3D プリンタによって立体表現の幅が広がったことは間違いない。

著者は、現在、3D プリンタを主な造形ツールとして、単一の素材からプログラムにより、モデルの内部構造や表面色を組み替えて立体物を出力することで、様々な質感や現象を鑑賞者に想起させる立体表現の研究を行っている。ここでは、「質感」とは透明や反射といった材質特性、「現象」とは柔らかさや動きといった、時間軸を伴う変化・変形している状態と定義している。

近年はネット化に押されつつも重要な情報メディアとしての役目を担っている新聞は、黒一色で、文字情報のみならず、ディザと呼ばれる点の密度変化による濃淡表現で、白黒という単一素材ながらも視認性の高

い写真イメージの伝達を可能とし、生産コストを抑えつつも表現の幅を広げている。3D プリンタにおいても、単一素材で様々な質感や現象を表現可能とすることで、身近で豊かな立体情報提示環境に繋がると考えられる。もし将来的に低価格で高性能なマルチマテリアル造形可能な3D プリンタが登場したとしても、単一素材で様々な質感や現象を創出するプロセス、言い換えれば、「そうでないもの（本来の構成要素とは異なる要素）」で「そうである（特定の材質や状態にある）」ように人間の頭の中に「現実」を作り出すプロセスを探ることは、人間の認知特性を探ることとしても意味がある。

本稿では、著者の3D プリンタによる質感・現象表現の初期試みからこれまでに至るまでを俯瞰して紹介する。単発で完成した表現のみを紹介するのではなく、その過程を見せることで、3D プリンタを使った立体表現のノウハウを共有したいと考えた。

## 2. 表現における条件

立体表現を行うにあたり研究開始時から意識していた項目として、重力と視線方向への考慮がある。重力への考慮とは、当然ながら現状の3D プリンタの材料のみでは立体物を宙に浮かせることはできず、全体が接続している形状であっても部分の重みで変形したり破損したりすることに対する対策である。視線方向への考慮とは、見る方向で質感が異なって見えるのは好ましくなく、また、反射のような材質特性において、視線方向に依存して立体物の表面色が変わることは重要となる。

これらの考慮を踏まえ、まず、透明や濃淡といった質感を対象に表現を模索した。



図 1 透明（口絵にカラー版掲載）

### 3. 記号的アプローチ

Wikipedia によると透明は「その先にあるものが透けて見えること。極端な場合には、そのものが存在しないかのように感じられること。」としている [1]。本研究ではモデルの質感を鑑賞者に伝えることが目的であるので、立体の存在感は残しながら、先にあるものが透けて見えるようにする必要がある。そこで、対象を最小限の構成要素で構成することで最低限の存在感は残しつつ、透けているような効果が生まれなかと考えた。

ここでは、図 1 のように、全体が一つに接続されたワイヤーフレーム形状にモデルを変形することでこれを透明とした。現実には立体物に輪郭は存在しない。つまり、構成要素を輪郭で提示することは、漫画における記号表現に近いアプローチと言えるだろう。このアプローチは、視点や距離に依存せず一定の質感を表現しやすい反面、世代や文化によってはこちらの期待する質感とは異なる質感に捉えられ、特定の質感を表現していることに対する学習を要す場合があるかもしれない。あらゆる鑑賞者に等しく対象の質感を認識できるようにすべく、次に知覚的な表現を試みた。

### 4. 知覚的アプローチ

「濃淡」の質感表現である。濃淡はモデルの部分毎に濃度変化しているようである。まずはじめに、モデルをグリッド単位で区切り、場所毎にグリッドの厚みを変えることで濃淡とならないかを試みた（図 2）。ところが、想定はしていたが、視線方向で濃淡の見えが大きく異なった。一度 2 次元に立ち返った。

2 次元イメージにおいて、2 値で濃淡を表現する手法にディザがある（図 3）。ディザは点の分布密度によって濃度変化しているように見える人間の知覚

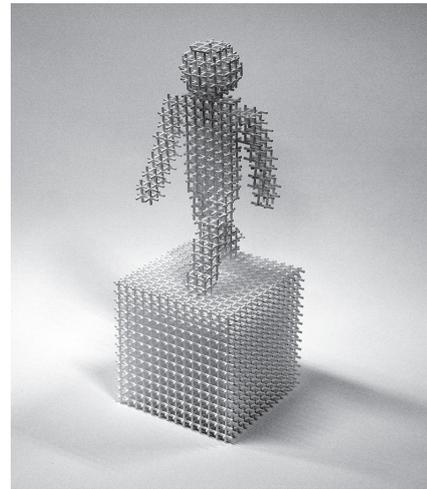
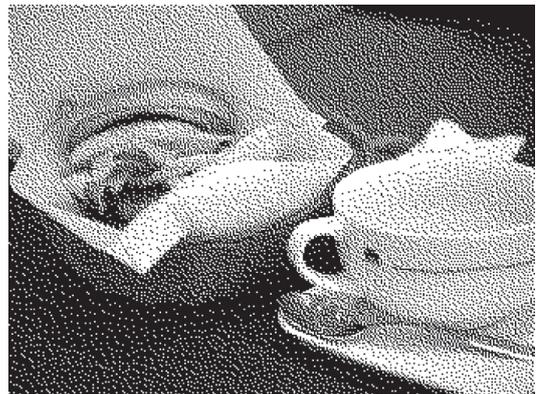
図 2 グリッド  
（口絵にカラー版掲載）

図 3 ディザ

図 4 クリスタル彫刻  
（口絵にカラー版掲載）

特性を考慮した手法である。新聞内のイメージもこのディザにより白黒の 2 値で濃淡を表現している。ディザを立体的に拡張し、クリスタル彫刻内に微小の球形状を点在させ見え方を確認したところ、立体においても点の分散具合で視線方向に依存しない濃淡が表現で



図5 濃淡（口絵にカラー版掲載）

きることがわかった（図4）。しかし、3Dプリンタでは宙に浮く点群は造形できない。そこで、点群を母点としてボロノイ分割を行い、ボロノイの境界線を線形状として立体化することでも同様に立体的な濃淡を表現できることを確認した（図5）。

次に「反射」の質感表現を試みた。反射において視線方向に依存した立体物の表面色の変化は重要である。視線方向に応じて立体物の表面色が変わるような構造が、特殊なデバイス等を用いることなく物質のみで作れないか思案した。ここでもやはり一度、2次元平面に立ち返った。2次元平面において、各視線方向の色情報を短冊状単位で敷き詰め、その上にレンチキュラ [2] と呼ばれるかまぼこ状のレンズシートをかぶせることで、解像度を犠牲にする代わりに視線方向に応じてイメージが変化して見える表現手法がある。レンチキュラの立体版であるレンズアレイを立体物の表面上に作りだし、これの立体化を試みるのも効果は期待できそうである。実際、レンズアレイとデバイス装置を用いた立体ディスプレイの研究開発 [3] も存在する。しかし、3Dプリンタの材料の現状を踏まえても、不透明の単一素材で同様な効果を作りだしたかった。

平面立体視の手法にパララックスバリア [4] がある。左目用と右目用のイメージを交互に結合したイメージの前にスリットを置くことで、鑑賞者の左右の眼にそれぞれ眼に対応するイメージが見え、それにより立体を知覚させる表現手法である。スリッドの概念を用い、遮蔽により視線方向によって見える色を制限させることで、鑑賞者にモデルの表面色が変わっているように見せることができないかと考えた。視線方向を考慮して彫られた溝先に着色が施された単位ユニットでモデルを構成することで、ある程度の色変化が起こせ



図6 金属（口絵にカラー版掲載）

ることを確認した。ただし、現状では解像度が乏しいため色変化は弱く、本来の反射のようにダイナミックな色変化は作り出せないため、ここでは、金属の光沢のような質感を作りだし、鏡面反射のような質感とした（図6）。色変化の質の向上は今後の課題である。

一方でCGにおいても環境マップと呼ばれるテクスチャ画像から視線方向とモデルの法線方向に位置対応した色を着色する簡易表現で反射を表現できるように、厳密にモデルの表面に周囲環境が写り込まなくとも、視線方向に応じてモデル表面が変化するような構造を持たせることで反射の質感を想起させられるかもしれない。これらを考慮した反射表現は現在考案中である。

## 5. 認知的アプローチ

反射についての別のアプローチを考えた。以前、NTT コミュニケーション科学基礎研に客員研究員として滞在していた際、円柱状の3Dモデルに貼られたテクスチャマップが視線と同じ向きに回転移動するとき、テクスチャマップが表面に着色された色だと鑑賞者は認識し、逆方向に回転するときは反射しているように認識する、という研究 [5] を見たことがある。このように、視線方向に応じて逆方向に色変化が生じているように鑑賞者に感じさせる構造を作れば反射を認識させることができると考えた。

一方、ホロウマスク錯視と呼ばれる、凹面の顔が通常の凸面の顔として認識される錯視 [6] がある。この錯視を応用した、凹んだ構造に凸でいるような画像を描写することで、視線に応じて動いて見えるようなだまし絵表現 [7] がある。この人間の認知特性を質感に用いて、凹んだ部分に膨らんで見えるような着色を施すことで、鑑賞者に凸と凹を錯覚させ、視線方向に応

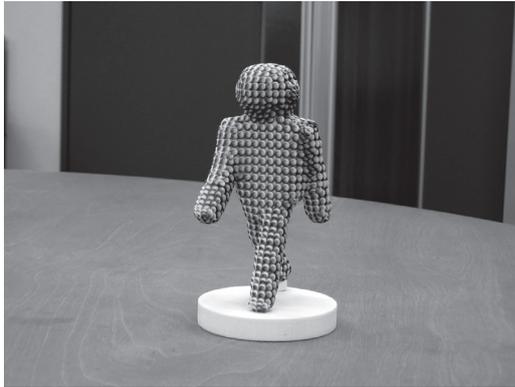


図 7 反射  
(口絵にカラー版掲載)



図 10 動きの伝達  
(口絵にカラー版掲載)

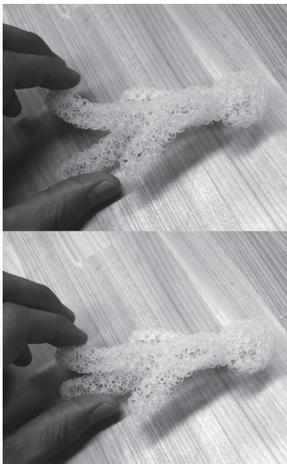


図 8 リング構造  
(口絵にカラー版掲載)

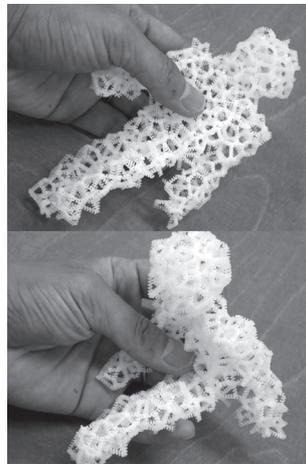


図 9 バネ構造  
(口絵にカラー版掲載)

じて色が変化しているように見えることで反射しているような質感が生まれないかと考えた。具体的には、モデルを構成する球形状の一部分が窪んでいて、窪んだ部分に周囲と逆の陰影を着色した(図 7)。

## 6. 触覚的アプローチ

3D プリンタによる立体造形は、視覚以外の感覚要素のデザインも可能とする。例えば、触感である。ここでは、モデルの表面と内部をリング構造(図 8)やバネ構造(図 9)で構成することで、単一素材でも柔らかさが変更可能となったことを確認した。場所毎にリングやバネの大きさや太さを変えることで、部分で柔らかさを変えることができる。ユーザに柔らかさを伝える手段としては、近年登場している食べられる立体物を造形するフード 3D プリンタ [8] を用いて、飲食者に応じて異なる触感を提供する応用が考えられる。

## 7. 動きの伝達

静的な立体物に少ない外部エネルギーを与え、複雑な動きを提示することができないかと考えた。電子デバイス等を駆使した動きの表現はエネルギー消費量が多いが、少ないエネルギーで同様の動きの伝達できれば運用コストの低減に繋がる。また、現実の動きの物理的な模倣ではなく、鑑賞者に動きを想起させる認知的なアプローチは、動きに対する人間の認知の解明に繋がる。アニメーションとはもともと「生命を与える」という意味があるが、命のないものに実際に命を与えるのではなく、命を持っているように鑑賞者に認識させる、ということにおいて、本研究は本来のアニメーションの延長上にあると言えるだろう。

鑑賞者に動きを想起させる様々な立体構造を模索した。ここでは、その一つの、先の反射表現で用いた技法を応用したものを紹介する。溝を用いた反射表現は、溝底が見える方向を制限することで、視線方向に応じて異なる像が提示される。回転方向順にアニメーションのフレームイメージを適用しこれを回転させることで、連続したイメージを鑑賞者に提示しアニメーション効果を作り出すものである(図 10)。上下視線方向により、異なるアニメーションを提示させることも可能である。

初期アニメーション用装置にゾートロープ [9]、動く絵本としてスリットアニメーション [10] がある。前者は残像現象、後者は補間作用を活用したものであるが、本手法はこれら両者の効果を引き出す立体的な構造となっている。なお、その他の動きの伝達表現の試みは、著者の HP [11] で鑑賞できる。

## 8. おわりに

将来的に、回路やセンサ、アクチュエータ等もいっ

しよに造形できるような 3D プリンタが登場するかもしれない。それによって実現時間が短くなることは大きな利点である。そこに人間の特性を加えて時間軸を持った立体物をデザインすることで、これまでなかった立体表現が生まれるかもしれない。今回の動きの伝達表現では静止した立体に少しのエネルギーを与えて時間軸を持つ立体へと拡張した。同様に、時間軸を持つ立体物にそれ以外の要素を与えることで、新しい概念を創出するのではないかと考えている。

現在、著者は様々なアプローチで現実の質感・現象を対象とした立体表現研究を進めている。単一素材で様々な質感・現象を鑑賞者に想起させることができれば、表現の幅が広がり立体を用いた豊かなコミュニケーションが展開されることを期待している。一方で、著者は、現実にある質感・現象のみならず、「新しい質感・現象」、「現実には有り得ない質感・現象」の表現を行うことを予定している。それは、単なるアート表現としてではなく、それにより、人間の感覚を拡張させる可能性があると考えている。将来、4次元以上を自然に知覚可能とするような立体物が生まれる可能性があるかもしれない。時間軸を1次元と考えれば、ある意味、それはすでに始まっていると言えるかもしれない。

3D プリンタにより表現の幅が広まった今、考案した個々の表現の有用性の検証に時間を要することよりも、まず表現の可能性を探求することが先決ではないだろうか。最終的に表現を利用するのはユーザであり、結局ユーザによって必要な表現であるのであれば残る。それがどうして必要とされたのか、検証はその後も間に合うのではないだろうか。

プログラミングを介した 3D プリンタによる造形は、実体のない自分の捉え方を実空間内に万遍なく物質に還元する機会を提供してくれる。それによって出力された立体物は、同一実空間で自身の考えと他者の考えを照らし合わせる機会であると共に、客観的に自分自身と向き合うインタフェースであるとも考えている。そのような意味で、3D プリンタによる造形はそれ自体が人間の認知活動の検証を含んでいると言ってもいいのではないだろうか。

本研究は科学技術振興機構さきがけの研究助成による委託研究である。本稿執筆にあたり多くの助言等を頂いた東京藝術大学芸術情報センター助教の松井茂氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] wikipedia「透明」：  
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E6%98%8E>
- [2] レンティキュラ方式の原理：  
<http://panda.ecs.cst.nihon-u.ac.jp/oyl/3D/lenti.html>
- [3] 吉田俊介, Roberto Lopez-Gulliver, 矢野澄男, 井ノ上直己, インタラクシオン 2009, 情報処理学会, IPSJ Symposium Series Vol.2009, No.4, pp.1-8, 学術総合センター, 2009.3.5-6.
- [4] パララックスバリア方式の原理：  
<http://panda.ecs.cst.nihon-u.ac.jp/oyl/3D/parab.html>
- [5] 竹井成和, 藤崎和香, 西田真也 (2009年1月) 「回転三次元シリンダーを用いた知覚的曖昧性の知覚潜時に与える影響の検討」 視覚学会冬季大会 (東京)
- [6] ホロウマスク錯視：  
<http://www.kecl.ntt.co.jp/IllusionForum/v/hollowMask/ja/>
- [7] YouTube「首振りドラゴン」：  
<https://www.youtube.com/watch?v=ax4yS9JJeJQ>
- [8] 砂糖菓子を出力できる 3D プリンタ「ChefJet」：  
<http://the-sugar-lab.com/>
- [9] wikipedia「ゾートロープ」：  
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E3%81%AE%E3%81%9E%E3%81%8D%E7%B5%B5>
- [10] Slit Animation.com「スリットアニメーション」：  
<http://slitanimation.com/%E3%82%B9%E3%83%AA%E3%83%83%E3%83%88%E3%82%A2%E3%83%8B%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%B3%E3%81%A8%E3%81%AF/>
- [11] 著者 HP：  
<http://jun-fujiki.com/monumations/>

## 【略歴】

藤木 淳 (FUJIKI Jun)

2007年九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻博士課程後期修了。2008年日本学術振興会特別研究員 (PD), NTT コミュニケーション科学基礎研究所客員研究員, ソニーコンピュータサイエンス研究所訪問研究員, 2011年国際メディア研究財団研究員を経て、現在、科学技術振興機構さきがけ専任研究者、東京藝術大学 J S T 研究員、武蔵野美術大学非常勤講師。博士 (芸術工学)。