

1 個ずつことなる製品の連続生産をめざした design と製造の試み

Trial for designing and continuously manufacturing products that are different one-by-one

金田 泰

Dasyn.com, yasusi@kanadas.com

キーワード: ジェネラティブ・デザイン, 螺旋 3D 印刷法, シングルトン連続生産

要旨: 消費者の嗜好は多様化し、商品の種類が増加して 1 種類ごとの生産量は減少している。3D プリンタの出現によって原理的には 1 個ずつことなる製品をつくることも可能になっているが、design にコストがかかるために実現されていない。報告者はジェネラティブ・デザインの手法を使用して 1 個ずつことなる製品を連続生産する **シングルトン連続生産** のための方法を開発している。開発中の方法では従来の設計ツールを使用するかわりにジェネラティブ・デザインのためのプログラムと Web インタフェースを開発・使用し、設計パラメタを乱数などを使用して自動生成することによって 1 個ずつことなる製品を生産する。現在、この方法によって形や模様を design した LED 電球やランプシェードの製造・販売をこころみている。まだこの方法を部分的に適用しているだけだが、今後この方法とそれを使用した製造をさらに発展させるとともに、それをうまくマーケティングや販売につなげていきたい。

1. 緒言

1970 年代以降、消費者の価値観や嗜好は多様化し、商品の種類が増加して種類ごとの生産量は減少してきた。その後、日本ではバブル崩壊などによって逆の傾向もあらわれた⁽²⁾が、基本的な潮流は変わらないとかんがえられる。

従来の生産法においては多品種少量生産はコストを増大させた。大量生産に向けたライン生産においてはもちろんだが、多品種少量生産をめざしたセル生産においても製造する品種のきりかえにはオーバーヘッドがかかる。そのため、とくに 1 個ずつことなる製品をつくろうとすれば製造コストは大幅に増大する。

これに対して生産に付加製造 (additive manufacturing, AM) を使用すれば、品種のきりかえによるオーバーヘッドをなくすることができる。すなわち、3D プリンタによって原理的には 1 個ずつことなる製品を連続生産することも可能になっている。3D プリンタにおいては設計データ (G コード) をいれかえるだけでことなる製品をつくることのできるため、1 個ずつことなる製品の連続生産が可能である。このような連続生産を **シングルトン連続生産** (singleton continuous production, SCP) とよぶ。

このように AM によって原理的には SCP が可能になるが、設計データを 3D プリンタに連続的に供給できないので実際には SCP を実現できない。設計者が 1 個の製品を design するには通常すくなくとも数週間以上の時間がかかるから、design ツールとしてコンピュータを使用するとはいえ製品の design は基本的には人間がおこなうので、設計データを連続的に供給することはできない。そのため、

いくら製造コストがふえなくても design コストが大幅にふえるから、連続生産でなくても 1 個ずつことなる製品をつくることはほとんど不可能だった。

この問題を解決するには design をコンピュータによっておこなう、つまり適切なジェネラティブ・デザインをおこなえばよい。つまり、人間が直接 design するかわりに **メタデザイン** をコンピュータにあたえて design させればひとつのメタデザインからコンピュータが複数の design をうみだせるので、design がネックになって 1 個ずつことなる製品の連続生産ができないという問題は解決される。

報告者は螺旋 3D 印刷法という独自の技術によってランプシェードなどを製造・販売しているが、そのための design 法としてジェネラティブな方法を使用している。すなわち、従来の設計ツールを使用するかわりにジェネラティブ・デザインのためのプログラムとメタデザインのための Web インタフェースを開発・使用している。そこで、この design 法に適した SCP のためのメタデザイン法を開発した。この方法では設計パラメタを乱数などを使用してひとつのメタデザインから任意個の G コードが自動生成できるようにして、1 個ずつことなる製品を連続生産する。現在、この方法を LED 電球やランプシェード (3D デザインランプ®) の製造に部分的に適用している。

2. 螺旋 3D 印刷法

報告者は印刷ヘッドを上下させながらフィラメントを巻いていくことができる螺旋 3D 印刷法という方法を独自開発し、それをつかった透明なランプシェードなどを製造・販売しているが、まずこの印刷法の原理と特徴についてかんたんに説明する。

2.1. 螺旋 3D 印刷法の原理

従来の 3D 印刷においては、まず 3D CAD を使用してモデルを設計し、そのモデルをスライサとよばれるソフトウェアで水平にスライスして多数の薄い層を生成し、層ごとに造形する。スライサは加工の手続きを G コードという言葉によって記述し、記述された設計データが 3D プリンタにおくられる。G コードは層という概念に制約されていないから、3D プリンタのヘッドは従来の 3D 印刷におけるのより実はもっと自由にうごかせる。

螺旋 3D 印刷ではまずモデルを設計し、その結果にもとづいて 3D プリンタを使用して製造することは従来と変わらない。3D プリンタとしては安価な熱溶解積層型 (Fused Filament Fabrication, FFF) のものを使用する。しかし、従来の CAD では設計時にはフィラメントの向きや密度 (厚さ・断面積) を考慮しなかったのに対して、螺旋 3D 印刷

においてはそれらもあわせて設計する．現在はほぼフィラメントに対応する「糸」を螺旋に巻いたものをモデルとしている(4,3) (図1)．そのため設計に従来のCADやスライサを使用することはできず，かわりに専用の方法やプログラムを使用する．

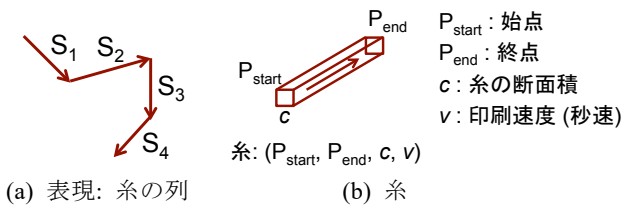


図1 螺旋3D印刷におけるモデルの表現

形状をつくるには**モデルの変形**という方法を使用する．すなわち，複雑な形状をいきなり糸の列として design するのは容易でなく，印刷可能でない (印刷中にくずれる) 形状が生じやすい．そのため，印刷可能であることがわかっている基本モデルを選択し，それを変形して形状を生成する．その例を図2に示す．ここでは変形の結果として球を生成しているが，球も基本的な形状であるからランプシェードなどを design する際に基本モデルとして使用している．

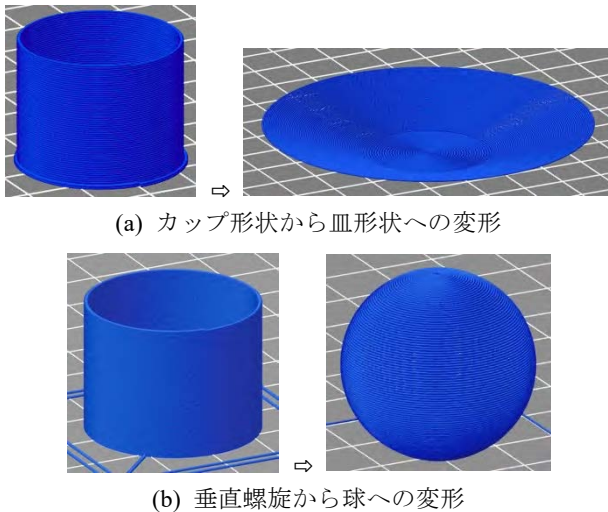
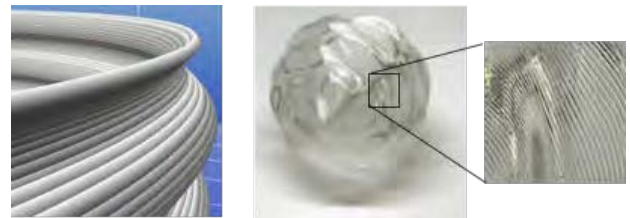


図2 変形の例 (Repetier Host による表示)

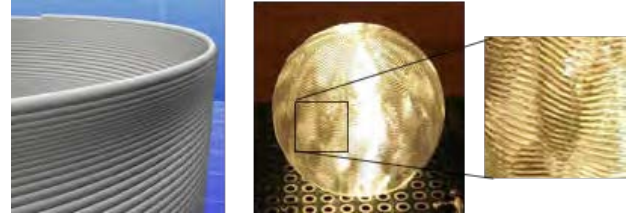
こまかい形状やフィラメントの疎密などによるテクスチャをつけるためには，図3に示すように (a) モデルをこまかく変形させる，(b) フィラメントを上下にうねらせる，(c) フィラメントの断面積を変えるという3種類のの方法を使用する．

2.2. 螺旋3D印刷法の特徴

螺旋3D印刷法にはつぎのような2つの特徴がある．第1の特徴は，従来の3D印刷法ではつくれなかった軽量で薄いわりに強度があるプラスチックが比較的短時間かつ低コストで製造できることである．従来の方法では層ごとに印刷するので，薄くすると層のつぎめなどのために強度が低下する．しかし，螺旋3D印刷法では螺旋状に印刷するので層がなく層のつぎめもないので，薄くても比較的強度が高い．



(a) こまかい変形 (deformation) による模様の生成



(b) うねり (ヘッド上下動, vibrato) による模様の生成



(c) 断面積変化 (modulation) による模様の生成

図3 3種類のテクスチャ・模様生成法

第2の特徴は，フィラメントを1回螺旋状に巻くだけで多様な形状がつくれて，その表面に微細なテクスチャや模様が生じることである．球のような形状に関してはサポートなしに曲線的な下面や閉じた上面がつけられるので，ピンポン玉のような中空の球がつけられる．サポートが不要なので後処理もほぼ不要である．前述の3種類の方法を使用すれば表面にテクスチャや模様がえがけるので，たとえば透明なフィラメントを使用すれば，図3に示したように場所によって光の反射屈折が変化する複雑で微妙な模様をえがくことができる．

3. ジェネラティブ・デザイン適用と design ツール

螺旋3D印刷法はジェネラティブ・デザインの適用を前提として開発した．そこで，ここではまずジェネラティブ・デザインについて述べ，つぎにそれにもとづく螺旋3D印刷の design ツールについて説明する．

3.1 ジェネラティブ・デザイン

現在では，コンピュータを design の中核で使用する新しいデザイン法としてジェネラティブ・デザイン⁽¹⁾，あるいはアルゴリズムック・デザインとよばれる手法が浸透してきている．3D印刷においては，オブジェクトを造形するとき通常はその表面の形をCADソフトウェアとマウスなどを使用して設計する．この方法ではその形を設計者自身がきめる．これに対して，造形するオブジェクトの形をプログラムや数式によってきめるやりかたがジェネラティブ・デザインである．これはコンピュータを design の中核で使用する，比較的新しい design 方法である．このデザイン法を採用する目的は様々だが，機械設計においては最適化 (たとえばトポロジー最適化) が目的であることが

多い。ジェネラティブ・デザインによって人手で描画することが困難な複雑で微妙な様々なパターンが生成できる。

「ジェネラティブ (generative)」ということばはデザインや設計よりもグラフィクスや音楽などのアートとむすびつけられてきたとかがえられる。ジェネラティブ・デザインもジェネラティブ・アート^(7, 8)もプログラムや数式を使用して生成されるが、とくにグラフィクスにおいては Processing というプログラミング言語と強くむすびついている。ジェネラティブ・アートとは、コンピュータ・プログラムや数式のような「遺伝子」から生成されるアートのことである。ジェネラティブ・デザインもそういう「遺伝子」によるデザイン (設計) のことを意味する。

フラクタルやカオスがそれをうみだす数式そのものからは想像できない形を生成するように、プログラムが生成するデザインはそれを実行することによって創発して (「遺伝子」が発現して)、はじめて姿をあらわす。Processing による平面アート⁽⁷⁾のように形状がプログラムによって自由に決定されるときはもちろんだが、建築のようにおおよその形が事前にきめられているときでも、その細部はプログラムを実行してはじめて決定される。

3.2 螺旋 3D 印刷のための design 法とツール

螺旋 3D 印刷においては「糸」によるモデルを design するが、そのためにジェネラティブ・デザインを使用している。すなわち、Python 言語によるライブラリ (API)⁽⁵⁾ を使用してまず円筒や球などのモデルをオブジェクトとして生成し、それをメソッドによって変形して望みのかたちをつくる⁽³⁾。

このライブラリを使用するにはプログラムを記述する必要がある。しかし、design のたびにプログラムを記述するのは手間がかかりすぎるしスキルが必要である。そのため日々の design においては、また一般のユーザに提供するには、より容易なデザイン・インタフェースが必要である。そこで、変形による形状生成やテクスチャ生成のための関数を三角関数・矩形波などの波だけに限定した「波合成モデル」を設計するための Web インタフェースを開発した (図 4)。

このインタフェースでは 3 種類の波をそれぞれ必要数だけ記述し、それらを基本モデル上にかさねることで形や模様をつくる。図 4 においては基本形状は球だが、円筒など、他の形状を基本にすることもできる。基本形状のサイズとフィラメントの基本ピッチはこの Web ページの上部で指定する。3 種類の波は図 3 に示した 3 種類の模様生成法 (断面積変化, 変形, うねり) に対応する。波はページ中央部で 1 波 1 行で指定するが、何波でも指定でき、線形合成 (かさねあわせ) される。波には縦波 (縦方向に進行する波), 横波 (横方向に進行する波), それらのくみあわせであるななめ方向の波がある。図 5 は縦波・横波をひとつの波に統合したななめ方向の波と、縦波・横波を合成してえられる複合波を対比している。この図は変形による波の例だが、他の種類の波でも同様である。図 4 における各行は波の形状 (図ではすべて sin) と振幅, 縦波・横波それぞれの周波数, 位相を指定する。平均の断面積とヘッド移動速度はページの下部で指定し、最後に最下部のボタンを押せば G コードが生成される。

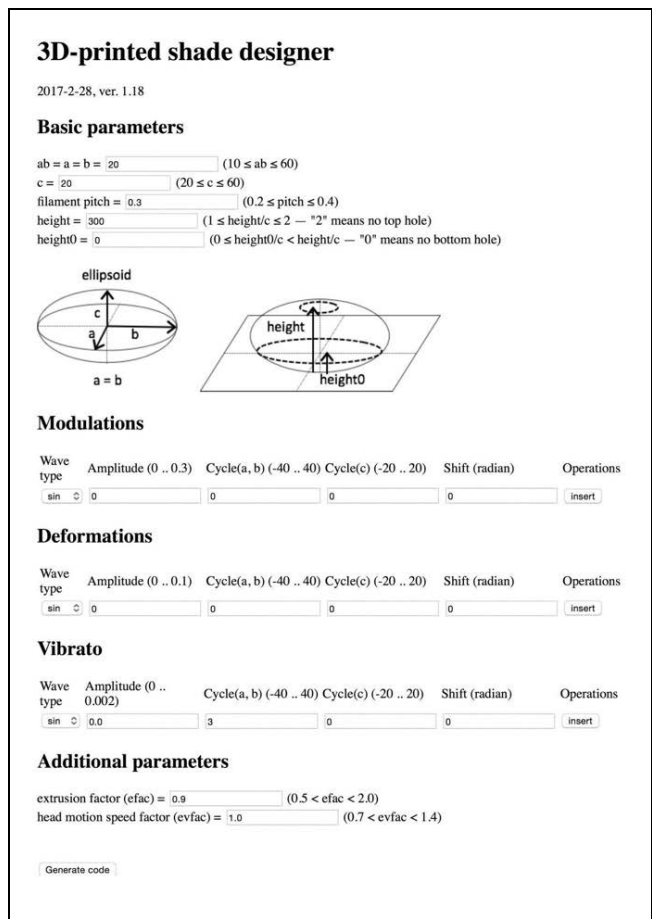


図 4 波合成モデルにもとづくデザイン・インタフェース (<https://3d-dl.com/about/>)

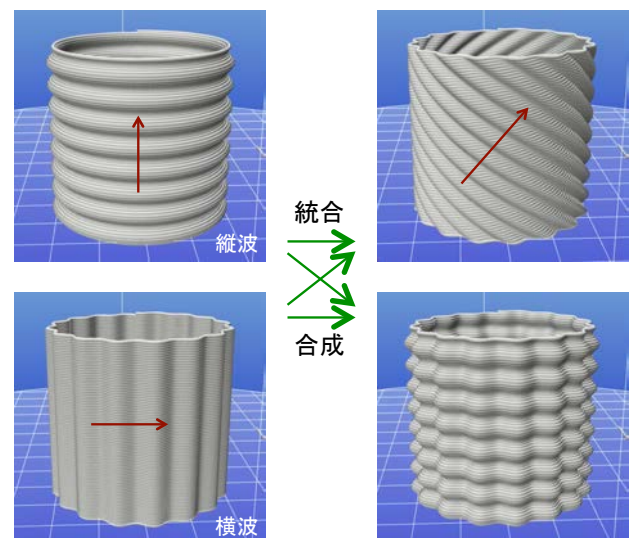


図 5 縦波・横波からの統合波と合成波の生成

4. SCP と螺旋 3D 印刷への適用

螺旋 3D 印刷によって 1 個ずつことなる製品の design を連続的に生成するための方法を考案した。ここでは一般的な方法を説明し、それを螺旋 3D 印刷に適用したより具体的な方法を示す。

4.1 シングルトン連続生産とそのための方法

緒言でのべたように、design を連続的に生成するにはコンピュータによって design すれば、つまりジェネラティブ・デザインをおこなえばよい。すなわち、人間が直接 design するかわりにメタデザインをコンピュータにあって design させる。ひとつのメタデザインからコンピュータが複数の design を生成できるようにすることは可能であり、そうすれば design がネックになって1個ずつことなる製品の連続生産ができないという問題は解決される。

このように1品種1製品である製品を連続生産することをシングルトン連続生産 (singleton continuous production, SCP) とよぶ。シングルトンということばを使用するのは、オブジェクト指向ソフトウェアにおいてひとつのクラスから1個だけインスタンスが生成されるときにこのことばを使用することからきている。

ひとつのメタデザインからコンピュータが複数の design をうみだすための方法を検討する。メタデザインはひとつの設計空間をさだめて、それに属する design を順序づける。Design するコンピュータにあてるプログラムがメタデザインだとかんがえることができる。そのプログラムを1回実行すると複数の design が逐次的に出力されるようにするか、またはそれを実行するごとに1個の design が出力されるようにする。後者においては乱数などをつかって1回ごとにことなるパラメタを入力すれば、出力される設計データも1回ごとにことなるものになる。前者においては生産を休止するときにプログラムの実行を凍結する必要がある点がすこし、やっかいである。したがって、後者のほうがあつかいやすいとかんがえられる。

4.2 SCP の螺旋 3D 印刷への適用

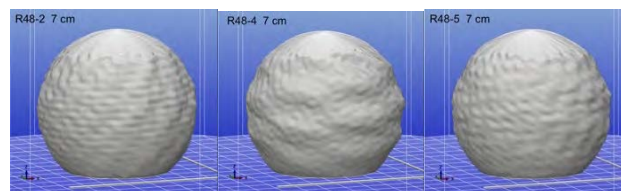
これまで3D デザインランプの design に使用してきた波合成によるジェネラティブ・デザインの方法をもとにして、螺旋 3D 印刷による SCP を実現する。前記のようにひとつのプログラムから実行のたびにことなる設計データをえるためのもっとも容易な方法は乱数を使用することであるから、乱数によって形状や模様をきめることにした。すなわち、波合成によって1個ずつ形や模様がちがう製品をつくるために、つぎのような2種類のシェード(カバー)のメタデザイン (Python プログラム) を開発した。

1. 基本は球形だが、それをすこしランダムに変形させたもの (図 6 参照)。
2. 球形だがヴィブラートによってフィラメントにランダムな粗密をつけたもの (図 7 参照)。

いずれも数 10 個の乱数を使用して1個ずつちがう形や模様を生成している。図にはそれぞれ3種のモデルと2種の製造物を示している。これらのメタデザインにおいては事前にきめた設計空間から乱数によってランダムに design を選択しているということが出来る。

5. 螺旋 3D 印刷における SCP の課題と解決策の案

ここでは螺旋 3D 印刷による SCP の課題とその解決策の案についてのべる。

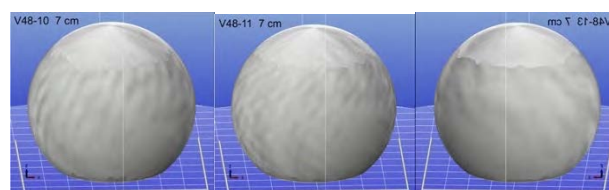


(a) ランダム変形シェードのモデル例 (Repetier Host)



(b) ランダム変形シェードを使用した電球の例

図 6 球にランダムな変形をくわえて生成したシェード



(a) ランダム・ヴィブラート・シェードのモデル例 (Repetier Host)



(b) ランダム・ヴィブラート・シェードを使用した電球の例

図 7 球にランダムなヴィブラートをくわえて生成したシェード

5.1 課題

現在、前章でのべたメタデザインにもとづく2種類のLED電球やそれを使用したペンダントライトを製造・販売している。しかし、前章の方法は非常にプリミティブであり、消費者をひきつけられる製品を生みだすにはいたっていない。マーケティングや販売とむすびつけるうえでいろいろな課題がある。それらの課題を列挙する。

- A. 顧客の嗜好の反映: 現在の方法においては顧客の嗜好に依存しない設計空間から単純に乱数で形や模様をきめているので、顧客の嗜好を反映していない。嗜好を反映させる方法が必要である。嗜好にあわないであろうモデルを製造前に人手で捨てることは可能である。しかし、捨てられるものが多いと選別にコストがかかるうえ、連続生産ができなくなる。
- B. 製品そのものか画像の生成: 販売するためには製造物そのものかその画像を顧客に見てもらわなければならない。つぎのような方法があるが、いずれにも課題がある。
 - B1. 従来の製造・販売方法においては製品をあらかじめ製造して陳列するか、写真撮影して Web などに掲載す

る。しかし、これを SCP に適用すると、顧客の嗜好にあわずに売れ残った製造物は廃棄するしかない。

B2. 製品をあらかじめ完成させるかわりにシェードだけを製造し、光源をつけたモックアップを写真撮影する方法がかんがえられる。シェードを 3D 印刷するだけならコストは低い。また、不要になったシェードを再利用して別のシェードが生成できる可能性もある。しかしモックアップのコストは低くても写真撮影や web への掲載は自動化できない部分があるためコストは高い。

B3. G コードから製造前に画像を生成して web などに掲載できれば、製造前に販売できる。そして注文されたものだけ製造すればよい。写真にちかいグラフィクスが生成できればこの方法が実現できる。しかし、現在のところは製造しなければ満足な画像が生成できない。それは、3D デザインランプの販売においてはフィラメントを積層した複雑な形によって屈折・反射した光を見せるべきだとかんがえられるからである。

C. 多品種の陳列の方法: 写真にせよグラフィクスにせよ、その陳列場所を確保する必要がある。実際に陳列する場合には棚やテーブル、web の場合はページを確保する。また、顧客の目にふれやすく選択しやすい場所や方法で陳列する必要がある。Web 上では通常は 1 品種を 1 ページに掲載するが、SCP においては製造物 1 個ごとにページをわけるのは非現実的である。

D. 差別化: 製造物 1 個ごとに明確な差をつける、つまり差別化をはかる必要がある。乱数で形や模様をきめる場合、統計的に差がない乱数をつかった製造物は乱数をかえてもほとんど同じに見える場合がある。しかし、1 個ごとの差がわからなければ SCP を使用する意味がないとかんがえられる。

5.2 解決策の案

前節の課題について項目ごとに解決策の案を示す。ただし、いずれもまだためしていないので詳細は省略する。

A. 顧客の嗜好の反映に関する 2 案を示す。第 1 の案はより高い確率で顧客の嗜好に合うと予想される形・模様が生成される方法を開発することである。たとえば図 6 や図 7 のようなモデルを生成するメタデザインよりはたとえば図 8 に例示するような設計空間を制約したメタデザインのほうが顧客に受容されるのではないかとかんがえられる。ただし、すくなくとも図 8 に関してはメタデザインが設計空間を必要以上にせばめているともかんがえられる。第 2 の案は敵対的生成ネットワーク (GAN) で代表されるような AI 技術を使用して顧客の嗜好に合う形・模様を生成する方法を開発することである。

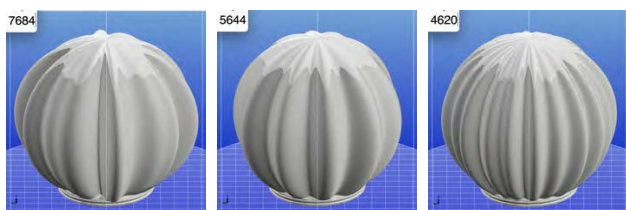


図 8 設計空間を制約したメタデザインによって生成されたモデルの例

B. 製品そのものまたは画像の生成に関してはつぎのような案がある。G コードを視覚化するプログラムにおいては通常はフィラメントの断面やその形までシミュレートしていない (ただし、この論文で視覚化に使用している Repetier Host では断面積が考慮されているので、断面積のちがいによる模様はある程度見てとれる⁹⁾)。しかし、それをシミュレートすればより写真にちかい画像が生成できる。そのモデルにもとづいてレイトレーシングなどの方法で光をシミュレートすることがかんがえられる。

C. 多品種の陳列の方法に関しては、類似の製造物は 1 ページにまとめるなどして階層的に陳列することがかんがえられる。

D. 差別化については、製造物の統計的な性質を 1 個ずつ乱数によって変化させることがかんがえられる。

6. 結言

報告者はジェネラティブ・デザインの手法を使用して 1 個ずつことなる製品を連続生産するシングルトン連続生産のための方法を開発し、この方法によって形や模様を design した LED 電球やランプシェード (3D デザインランプ®) の製造・販売をこころみている。しかし、現在はこの方法を部分的に適用しているだけであり、またそれによって生産した製品はかぎられている。今後は前章でのべた課題を解決してこの方法とそれを使用した製造をさらに発展させるとともに、それをうまくマーケティングや販売につなげていきたい。

文献

- (1) Bohnacker, H., Gross, B., Laub, J., and Lazzeroni, C.: *Generative Design*, Princeton Architectural Press, 2012, 日本語版: ビー・エヌ・エヌ新社, 2016.
- (2) 池尾 恭一: 消費の個別化とマーケティング戦略, *AD STUDIES*, Vol. 12, pp. 10–15, 2005.
- (3) Kanada, Y.: Method for Procedural 3D Printing Using a Python Library, *Journal of Information Processing*, Vol. 24, No. 6, pp. 908–916, 2016.
- (4) Kanada, Y.: 3D Printing of Generative Art using the Assembly and Deformation of Direction-specified Parts, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, No. 4, 2016.
- (5) 金田 泰: 3D プリンタもプログラミングで — draw3dp (ちょっと変わったプログラミング教室 03), *情報処理*, Vol. 58, No. 6, pp. 17–23, 2017-6.
- (6) 金田 泰, 螺旋 3D 印刷法とその照明器具への応用, *プラスチック*, 2019 年 3 月号, pp. 45-50.
- (7) Pearson, M.: *Generative Art: A Practical Guide Using Processing*, Manning Publishing Co., 2011. 日本語版: マット・ピアソン: *ジェネラティブ・アート — Processing による実践ガイド*, ビー・エヌ・エヌ新社, 2014.
- (8) Soddu, C., et al. ed., *Generative Art International Conferences*, <https://www.generativeart.com/>
- (9) 金田 泰, Repetier Host でみえるフィラメントの断面積変化, https://www.kanadas.com/weblog/2021/06/repetier_host1.html