

S0440105

方向指定つきの 3D 印刷法と設計法*

金田 泰

Direction-specified 3D Printing and Design Methods

Yasusi Kanada

Dasyn.com
Nakano-ku Yayoi-cho 4-2-16, Tokyo, 164-0013 Japan

In 3D printing methods such as FDM, the direction of printing dominates the appearance and the nature of the printed objects. However, the direction cannot be specified in conventional 3D-printing methods. In this presentation, methods for designing and printing direction-specified 3D objects and the advantages of these methods are described.

Key Words : Direction-specified design, Direction-specified 3D-printing, Fused deposition modeling, FDM, Additive manufacturing, AM, Computer-aided design, CAD.

1. 従来の 3D 印刷の問題点

繊維質のものなどを 3D 印刷するときには、そのかたちに「自然な方向」がある。たとえば、植物の葉には葉脈がある。また、人間の髪や(立体化された)書作品にも自然な方向がある。

FDM (fused deposition modeling) 型の 3D プリンタは印刷方向がフィラメントの方向をきめ、それによって「表現」された方向が印刷物の印象や性質をきめる。従来の 3D 印刷ではその印象を消そうとしてきたが、それをむしろ積極的に利用することもかんがえられる⁽¹⁾⁽³⁾。3D プリンタは通常は水平に印刷するので、印刷方向が「自然な方向」と矛盾しうる。この矛盾によって、自然な方向は表現できなくなり、場合によっては邪魔な方向がみえてしまう。それだけでなく、図 1 左にしめすような、いわゆる「階段効果」(staircase effect) がおこり、造形物の形状や強度が劣化する。あるべき印刷形状は図 1 右のようなものである。

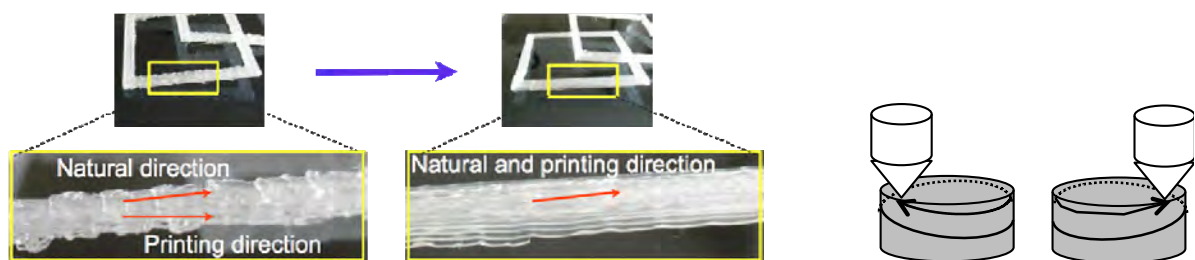


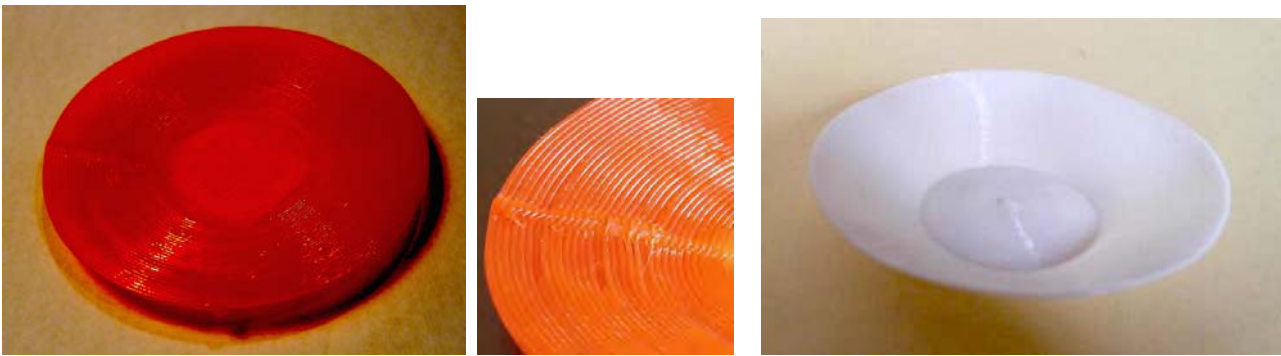
図 1 通常の 3D 印刷と自然な方向の 3D 印刷における印刷方向と自然な方向 図 2 層のないヘリックス (立体らせん)

2. 層に依存しない 3D 印刷法

前記のような問題がおこるのは、従来の 3D 印刷が「層」につよく依存しているからである。層への依存性をなくすことによって、印刷方向に関するしぼりをなくすことができる。層をつくるかわりに印刷ヘッドをなめらかに上昇させることによって、層と層のつぎめが美観をそこねることもなくなる。層のつぎめをなくした典型的なかたちはヘリックス (立体らせん, 図 1) である。図 2 にはヘリックスを変形して底をつけてつくった皿 (a) と、従来の方法でパラメタを調整してつくった皿 (b) とをならべている。全体写真だけではわかりにくいので、前者に関してはつぎめ部分の拡大写真もあわせてのせている。従来の方法でも皿を印刷することはできるが、つ

* 正員, Dasyn.com (〒164-0013 東京都中野区弥生町 4-2-16)
E-mail: yasusi@kanadas.com

ぎめが美観をそこねないようにするのは容易でない。



(a) 従来の方法による皿の全体写真と層のつぎめの拡大写真 (b) 提案する方法による皿の全体写真

図3 従来の3D印刷法と提案する3D印刷法による皿

3. 方向指定つきの設計・印刷法

3・1 方法論

「自然な方向」が設計時に指定できるようにするには、従来の3Dモデルをそのまま使用することはできない。そこで、モデル内の各点で方向がベクトルとして指定された**場指向ソリッド・モデル (field-oriented solid model)**⁽¹⁾⁽²⁾を使用する。その具体的な表現例は3・2にしめす。図3にしめすように、設計から印刷までのおもな手順は従来とかわらず**モデリング**、**ツールパス生成 (Gコード生成)**、(水平でない) **3D印刷**という3ステップで構成される。しかし、モデリングには従来のCADを使用することはできないので、あたらしいツールが必要である。ツールは試作中であり、一部はオープンにしている(後述)が、現在は部分的・限定的なものしかない。

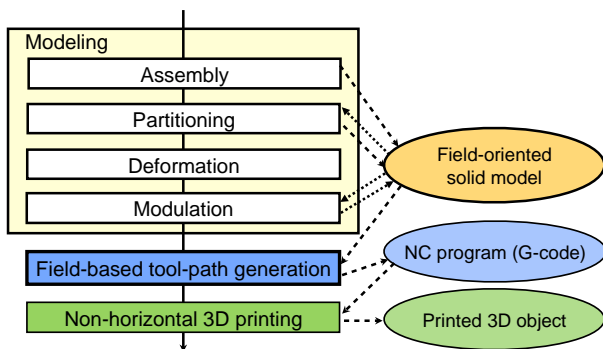


図3 方向指定3D印刷のための設計・印刷プロセス

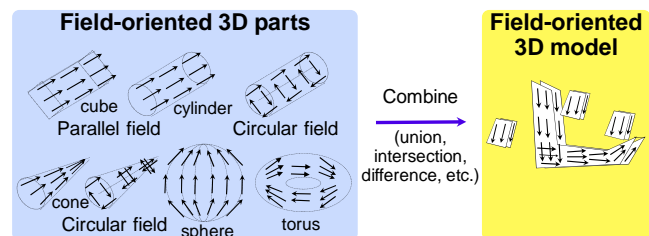


図4 Field-oriented modelingにおける部品のくみたて

モデリングのために、部品のくみたて (assembly)、**分解** (partitioning)、**変形** (deformation)、**変調** (modulation) という4つのプロセスをくみあわせる。これらの順序および回数は場合による。変調以外のプロセスについては前論文⁽¹⁾において説明しているが、この報告においては変形と変調を中心に説明する。図4には部品のくみたて (くみあわせ) を示している。モデリング・ツールは標準的な部品を用意し、それらをくみあわせてモデルをつくる (その試作品 draw3dp.py は <http://bit.ly/1EBVbSB> で公開中)。概念的には従来のCADにおけるのと同様である。**分解**⁽¹⁾⁽²⁾は順序どおりに印刷できないときにその順序を変更するためにおこなうが、ここでは説明を省略する。**変形**⁽²⁾によって、用意された部品のくみあわせではつくりにくいカタチをつくる。その詳細は3・3において説明する。また**変調**⁽⁴⁾は印刷物とくにその表面のテクスチャをつくるためにおこなう。その詳細は3・4において説明する。これらのプロセスはいずれも場指向ソリッド・モデルを入力し場指向ソリッド・モデルを出力する。

ツールパス生成のステップでは、モデリングによって生成された場指向ソリッド・モデルからツールパスを生成する。ツールパスの表現としては、おおくの3Dプリンタにおいて使用されているGコードを使用するのが便利である。3D印刷は層に依存しない点で従来とはことなるが、通常の3Dプリンタが使用できる。ただし、上下の移動がおおきいときは5軸・6軸の3Dプリンタ⁽⁵⁾やデルタ型の3Dプリンタを使用するのがよい。

3・2 部品の表現

方向指定つきの設計・印刷法を実現するには、図3右側の field-oriented solid model の表現の選択が重要である。変形 (deformation) につよい表現がよいが、変形を適用しやすいことと、さまざまな変形をくわえてもモデルとしての適切さをうしなわないようにすることは容易に両立しない。現在は変形の適用しやすさを重視して、つぎのような表現を選択している。FDM方式のようにフィラメントをかさねて造形する3D印刷においては、部品をつぎのように、ふとさのある糸 (string) S_i のならび (S_1, S_2, \dots, S_n) として定義することができる⁽²⁾。

$$S_i = (P_{i_{\text{start}}}, P_{i_{\text{end}}}, c_i, v_i)$$

ここで $P_{i_{\text{start}}}$ は糸の始点であり $P_{i_{\text{end}}}$ はその終点である (両者は直線によってむすぶことを仮定する)。 c_i は糸の断面積 (これはフィラメントの密度に関するパラメタによっておきかえられる)、 v_i は印刷速度 (秒速) つまりヘッドの移動のはやさである。 v_i は概念的には不要だが、実装 (糸の印刷) のためには便利なパラメタである。

このモデルでは部品の各点におけるフィラメントの方向が規定され、厚みのある部品は内部のフィラメントの構造や密度も記述される。これらはいずれも従来の CAD や STL においては記述できない特性である。

3・3 変形

モデリング・ツールのライブラリには単純なかたちだけが登録されているが、それらの変形とくみあわせ (くみたて) によって多様なかたちをつくることができる。変形という操作は多様なかたちがつくれるだけでなく、3D印刷可能⁽²⁾な部品を用意しておけば変形後も印刷可能性を維持しやすいという利点もある。

変形のために `deform_xyz` と `deform_cylinder` という2つの関数を用意している⁽²⁾。

`part.deform_xyz(fd(x, y, z), fc(c, x, y, z), fv(v, x, y, z))`

この関数は直交座標にもとづいて部品 `part` を変形する。関数 $fd(x, y, z)$ (最初の引数) は変形前の位置 (x, y, z) を変形後の位置 (x_1, y_1, z_1) にマップするので、 fd は3つの値をかえす。関数 $fc(c, x, y, z)$ (2番めの引数) は変形前の位置 (x, y, z) における断面積を変形後の位置 (x_1, y_1, z_1) における断面積に変換し、関数 $fv(v, x, y, z)$ (3番めの引数) は変形前の位置 (x, y, z) における印刷速度 (ヘッド移動速度) を変形後の位置 (x_1, y_1, z_1) における印刷速度に変換する。

`part.deform_cylinder(fd(r, q, z), fc(c, r, q, z), fv(v, r, q, z))`

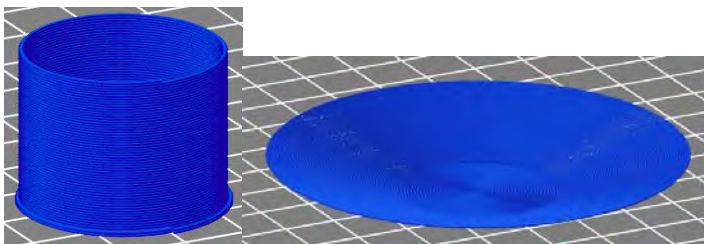
この関数は円柱座標にもとづいて部品 `part` を変形する。機能は `deform_xyz` とかわらず、座標系だけがことなる。あつかう部品としてらせん状のものが多いため、直交座標より円柱座標にもとづくこの関数のほうが有用である。

これらの変形関数は糸の始点と終点の座標を変換する。糸が直線状であることはかわらないので、途中の点の誤差は変化する。変形後も印刷可能であるためには変形関数は連続であるべきであり、また変形による拡大・縮小はおさえるべきである。おおきく拡大・縮小すると誤差が拡大して、うまく印刷できなくなる (これは、部品の表現を変形適用容易性重視できめたことの結果である)。

変形の例を図5と図6に示す。Repetier Host という3D印刷ツールを視覚化のために使用している。図5はヘリックスとうすい円柱 (底) とで構成されるカップとそれを変形してえられた図形を示す。図5(a)のカップはヘリックスの部分につぎのような変形を適用すると図5(b)のような皿になる。

`deform_cylinder(fdd(r, q, z), fcd(c, r, q, z), fvd(v, r, q, z))`,

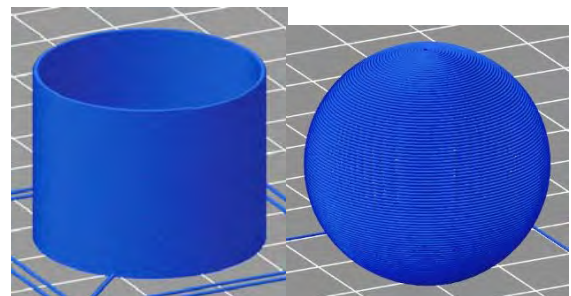
ここで $fdd(r, \theta, z) = (r + 1.05z, \theta, 0.3z)$, $fcd(c, r, q, z) = 0.96c$, $fvd(v, r, q, z) = v$.



(a) 変形前のカップ

(b) 変形後の皿

図5 カップからの変形の例



(a) 変形前のヘリックス

(b) 変形後の球

図6 ヘリックスからの変形の例

ただし、底のサイズはヘリックスを変形してえられた図形にあわせる必要がある。

図 6 はヘリックスとそれを変形してえられる図形を図示する。図 6(a) はもとのヘリックスである。このヘリックスから図 6(b) の球がえられる。この変形はつぎの式にもとづいているが、ここではフィラメントのピッチが保存される(すなわち、ヘリックスを縦方向には伸縮せずに球にまきつける変形をする)。

`deform_cylinder(fds(r, q, z), fcs(c, r, q, z), fvs(v, r, q, z)),`

ここで $fds(r, q, z) = (\text{Radius} * \sin(\pi z / \text{cylinderHeight}), q, r - \text{Radius} * \cos(\pi z / \text{cylinderHeight}))$,

$fcs(c, r, q, z) = 1.2 c$, $fvs(v, r, q, z) = 1.2 ((fr(r, q, z) / \text{Radius})^2 + 0.1) v$.

パラメタ `cylinderHeight` は変形前のヘリックスの高さを意味し、変形後の球の経線の長さの半分にひとしい。前論文⁽²⁾⁽¹⁾にはほかの例もあげている。

3・4 ビットマップによる変調

通常の 3D 印刷においては印刷するオブジェクトの表面形状を設計時に指定するが、この方法はこの論文で提案する印刷法には適用しにくく問題点もある。つまり従来の CAD による方法では、文字や図形などを表面に付加すると、通常はそれらが別の層として形成される。この方法でこまかい文字や図形を正確に表現するのは困難であり、またその層がはがれる心配もある。また、この論文の方法では、部品の表面にあらかじめ文字や図形を付加する方法はライブラリに用意すべき部品数を増加させ、汎用性を低下させる。

そこで、フィラメントの断面積を変化させて凹凸をつくる方法を提案している⁽⁴⁾。この方法を適用することを部品を**変調**する (`modulate`) または変調をかけるという。前節までの方法を使用すれば、第 1 に部品にあらかじめ表面形状をあたえておくことができる。しかし、それは汎用的な方法ではない。第 2 に変形によって表面形状をあたえることもできる。目的によってはこの方法が適切だとかんがえられるが、この節では他の方法を提案する。それはフィラメントの断面積を変化させる方法である。印刷中にフィラメントの断面積を変化させれば、あまり大きな凹凸をつくることはできないが、比較的こまかい凹凸をつくることができるとかんがえられる。

フィラメントの断面積を変化させる方法としてはつぎの 2 つがある。

- フィラメントの射出速度を変化させる。
- 印刷ヘッドの移動速度を変化させる。

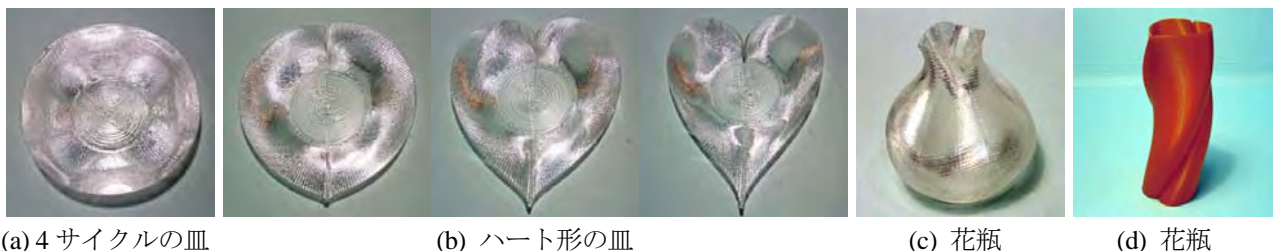
第 1 の方法のほうが直接的だが、より応答性がよい第 2 の方法によって変調することにした。3D プリンタにおいてはフィラメントを押し出すエクストルーダ (`extruder`) の動作の変化がヘッド先端のフィラメントの動作に反映されるまでの遅延が大きい。場合によっては数秒かかる。そのため第 1 の方法は応答性がわるい。3D プリンタの印刷ヘッドは慣性が大きい、それでも印刷ヘッドの速度のほうがはるかに応答性がよいので、第 2 の方法のほうがこまかい凹凸をつくるという目的には適切だとかんがえられる。そこで、この方法で変調をかける。

4. 方向指定つき 3D 印刷の実験

3・3 で説明した方法でカップを変形してえられたさまざまな形状の皿や容器を図 7 に示す。これらはそれぞれ 10~20 分で印刷できる。図 7(a) はヘリックスをひらたく変形してつくった皿 (<http://store.shopping.yahoo.co.jp/dasyn/1011-04.html>, <http://youtu.be/5P1vaahzW98>) だが、フィラメントを水平にちかい角度でまきつけるときもサポートは不要である。場所によって皿の角度やフィラメントの密度がことなるために光の反射に変化が生じている⁽²⁾。純粋な透明の PLA を使用することによってこのような輝きをえている。図 7(b) はヘリックスに円をハート型に変換する変形を適用してつくった皿 (<http://store.shopping.yahoo.co.jp/dasyn/3db0f5baf.html>, http://youtu.be/G9x14DZYN_8) である。円をハート形に変形させる関数⁽⁶⁾を使用している。図 7(c)⁽²⁾は三角関数を多用した花瓶 (<http://store.shopping.yahoo.co.jp/dasyn/1025-10.html>) である。図 7(d) は上記とおなじハート形をねじってつくった花瓶 (<http://store.shopping.yahoo.co.jp/dasyn/1073-01.html>) である (いずれも上記のサイトからサンプル品入手可能)。

ヘリックスを変形して球をつくることことができる。図 8 の左はこうしてつくった単純な球である。印刷時に球を 1 点だけでは支持できないため、支持にすこしくふうが必要である。しかし、通常の意味のサポートは使用していない⁽²⁾。図 8 の右は三角関数によって球をさらに変形してつくったオブジェクトである。図 9 にはビットマップによる変調の技法⁽⁴⁾を使用してつくったオブジェクトを示す。左は球を地図によって変調してつくった地球儀

(<http://store.shopping.yahoo.co.jp/dasyn/1201-03.html>, <http://youtu.be/YWx1vqig2-o>) である。右は半球 (正確には半球だけでなく高台をつけている) を英字によって変調してつくった碗である。



(a) 4 サイクルの皿

(b) ハート形の皿

(c) 花瓶

(d) 花瓶

図7 皿と容器

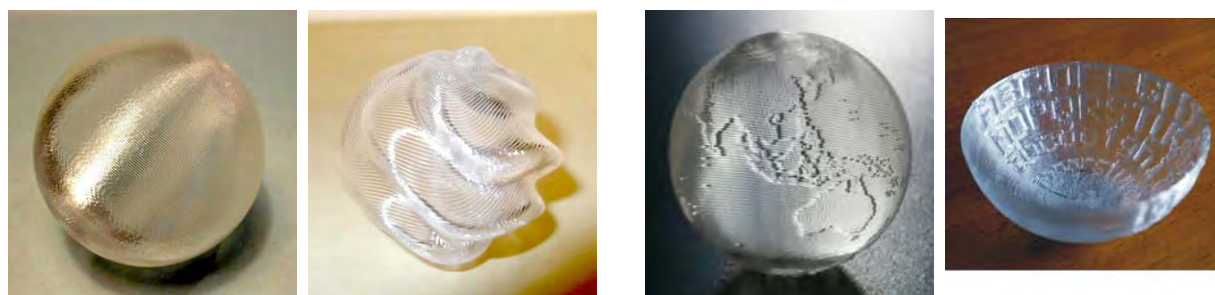


図8 球と変形球

図9 変調した球 (地球儀) と碗

地球儀は地図によって変調している。地図によって平面を変調すれば地図がそのまま表現されるが、球を変調すれば地球儀が作られる。Celsia Motherload (<http://www.celestiamotherlode.net/catalog/earth.php>) というサイトからえた NASA のデータにもとづく正距円筒図法による世界地図を 2 値化した、サイズが 300×150 の地図である。フィラメントの 1 周を基本的には 300 個の糸によって構成し、150 周で球を形成する。そして各糸にドットをマップする。すなわち糸の印刷速度を 2 つの選択肢 (2 値) からえらぶ。海と陸のコントラスト (フィラメント断面積の比, 速度比) をあまりおおきくすると印刷がうまくいかなくなるので, 1 対 1.3 ないし 1.4 くらいにしている。基本的にはどの緯度でも 1 周を 300 等分するが, このままでは極のちかくでは細分化されすぎる。そこで, 極のちかくでは点をまびいて印刷する。地球儀のモデル (糸の列) を生成する際に点をまびくこともできるが, draw という関数に点をまびく機能をいれているので, モデルは変更しなくてもよい。

5. 結 語

3D 印刷で造形すべきものがある「自然な方向」あるいは指定された方向を印刷物において表現できるようにするため, 層をなくして層のつぎめもなくした 3D 印刷法を開発し, 方向指定つきの設計・製造の方法論とそれにもとづく具体的なモデルや設計法を提案した。試作の結果, 従来の方法においては必要だった支持材料 (サポート) もなくして, シームレスでより美的な印刷を実現した。

文 献

- (1) Kanada, Y., "Method of Designing, Partitioning, and Printing 3D Objects with Specified Printing Direction", *2014 International Symposium on Flexible Automation (ISFA)*, July 2014.
- (2) Kanada, Y., "3D Printing of Generative Art using the Assembly and Deformation of Direction-specified Parts", *Rapid Prototyping Journal*, to be published, 2015.
- (3) Kanada, Y., "Natural-Direction-Consistent 3D-Design and -Printing Methods", *International Journal of Computer, Control, Quantum and Information Engineering*, WASET, Vol. 9, No. 4, pp. 689-693, 2015.
- (4) Kanada, Y., "Creating Thin Objects with Bit-mapped Pictures / Characters by FDM Helical 3D Printing", *8th Int'l Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, Oct. 2015.
- (5) Xuan Song, Yayue Pan, and Yong Chen, "Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multi-Direction Additive Manufacturing", *International Solid Free-form Fabrication Symposium 2013*, August 2013.
- (6) 山本 信雄, "ハート形曲線", http://www.geocities.jp/nyjp07/heart/index_heart.html