

[研究背景・概要]

現在の3Dプリンティング(積層造形)技術の多くは、材料同士の接着により造形する方式であり、完成物は途切れ目のない連続体となる。この方式の場合、造形中に不具合が起きやすい問題や、完成物を再び材料に戻すために多くの工程が発生する問題がある。一方で、材料同士を接着させるのではなく、特定の規格化された構成要素をジョイントにより上下前後左右に接続することで立体を造形する新しい手法が近年研究されており、その構成要素は「デジタル・マテリアル」と呼ばれている。立体を構成するデジタル・マテリアルは、分解を通して新たな立体の構成要素として再利用することができる。

デジタル・マテリアルに関する既往研究では、ジョイントの安定性や、完成物の構造的強度などが検討されてきたが、分解と組立の円滑な反復を実証した研究はまだ例がなく、実証できれば立体形状の試作の際に特に有用である。3Dプリンティング(積層造形)技術が一般化したことで、高速な試作(ラピッド・プロトタイピング)が可能となったとはいえ、出力には依然として時間を要している。デジタル・マテリアルを用いた円滑な立体物の形状試作を行えば、造形時間を大幅に短縮できるほか、造形後の形の修正もデジタル・マテリアルの増減により自由に行える。

以上の目的を踏まえて、我々は分解と組立のプロセスの円滑化に最適なデジタル・マテリアルとして、「ケルビン・ブロック」の設計と、組立のプロセスを自動化する「3Dアセンブラ」の実装を行った。空間充填性および自己整列性を持つ切頂八面体をデジタル・マテリアルの形状として採用し、また、いずれの面同士でも磁石によって引き合う特殊なジョイントを実装した。その結果、3Dアセンブラによる低精度なピック・アンド・ドロップであっても、自動で正確な組立が行えることが確認できた。

[ケルビン・ブロック]

i. 形状の選定

組立と分解を円滑に流れるように実現するために、本研究では構成要素の三条件として「単純な形状」「単純な接合方式」「空間充填性」を挙げ、それらを満たす形状の検討を行った。五種類の三次元空間を単一形状で空間充填が可能な一様多面体を、四つの観点から定性的に比較した結果、切頂八面体を最適形状として選択するに至った(表1)。切頂八面体は、下層が生み出した窪みにより、上層が安定して固定される性質(自己整列性)を持つ(図1)。






		Self-alignment	Rotation/flip invariance	Inter-locking	Smoothness of the surface
Regular hexahedron		Poor	Very good	Poor	Poor
Truncated Octahedron		Very good	Good	Very good	Very good
Rhombic Dodecahedron		Good	Very good	Very good	Good
Regular Triangular Prism		Poor	Good	Poor	Poor
Regular Hexagonal Prism		Poor	Good	Good	Poor

表1 形状の選定

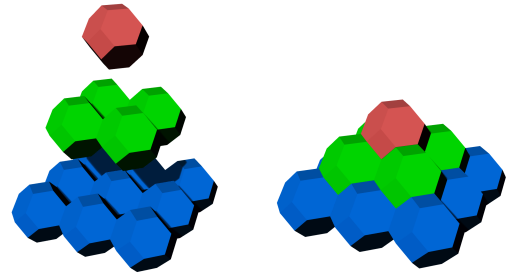
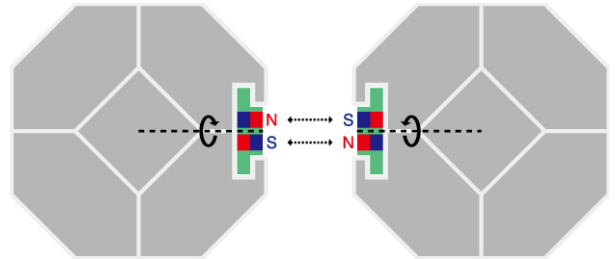


図1 切頂八面体の自己整列性

ii. 磁石接合機構

磁極の考慮を必要としない接続機構を開発した(図2)。切頂八面体の各面内部に回転式の磁石パーツ埋め込んでおり、切頂八面体の面同士を接近させることで、磁石の力で各面内のパーツが回転し接合する。こうしてデザインした構成要素を、切頂八面体の別名「ケルビン十四面体」にちなんで、本研究では「ケルビン・ブロック」と名づけた(図3)。大きさは直径40mmである。



3D Printed part  
Rotating unit  
Magnet

図2 磁石接合機構



図3 ケルビン・ブロック

ケルビン・ブロックの接合機構は、磁石の磁極の制約から開放されて自由な接合を可能とするだけでなく、組立の際のエラーを修正する機能も持つ。切頂八面体が本来持つ自己整列性に、磁石の引き合う力が加わることで、正しい位置から多少ずれたとしても、ケルビン・ブロックをピック・アンド・ドロップすれば正しい位置へと配置することができる。高速な操作を通して、正確な組立を行うことができるのである。

図4において示した左側は、正確な位置から落下する際の様子で、下層のケルビン・ブロックの接合部から垂直な位置を起点としている。一方、右側は誤差のある位置から落下する際の様子を示している。ケルビン・ブロックの直径を  $W_1$ 、正しい位置からの誤差を  $W_2$  とした時、 $W_2 < W_1/2$  の関係が成り立つ範囲内での誤差であれば、ケルビン・ブロックの特性により修正される。

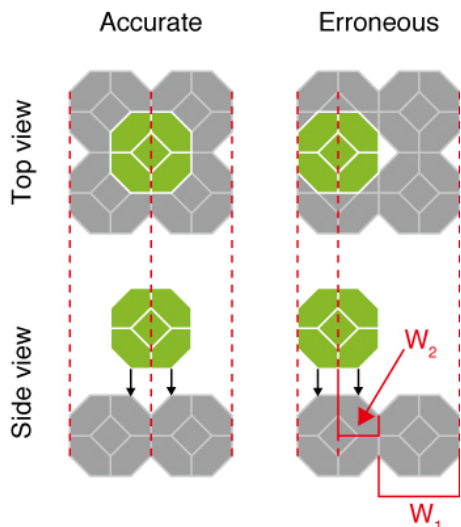


図4 ケルビン・ブロックのエラー寛容性

#### [3D アセンブラ]

ケルビン・ブロックのピック・アンド・ドロップを通した組立のプロセスを自動化する機械「3D アセンブラ (図45)」を開発した。3D アセンブラの主な機構は、各ケルビン・ブロックを適切な座標へと運びピック・アンド・ドロップを行う「エクストルーダ (図5右上)」部と、ケルビン・ブロックを一つずつエクストルーダへと引き渡す「セパレータ (図5右下)」部に分けられる。この二つの機構が交互に連続して機能することで、ケルビン・ブロックが組み立てられていく。

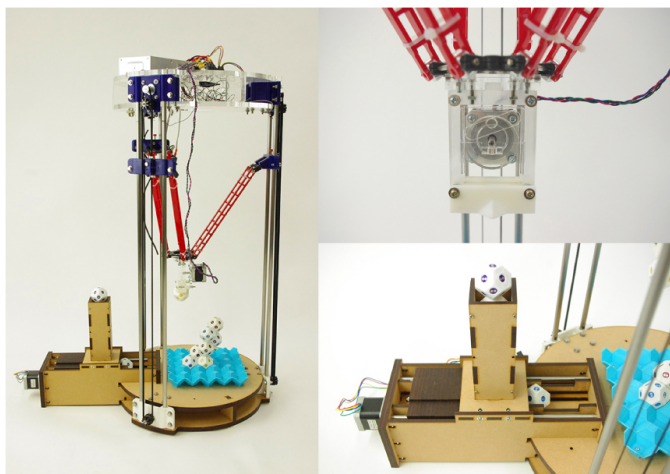


図5 3D アセンブラ

任意の三次元立体をケルビン・ブロックによって造形するため、簡易的なGコード生成ツール「Gコード・ジェネレータ (図6)」を実装した。GUI上で層ごとにケルビン・ブロックを配置する場所のみ選択することで、造形に必要なGコードを生成することができる。

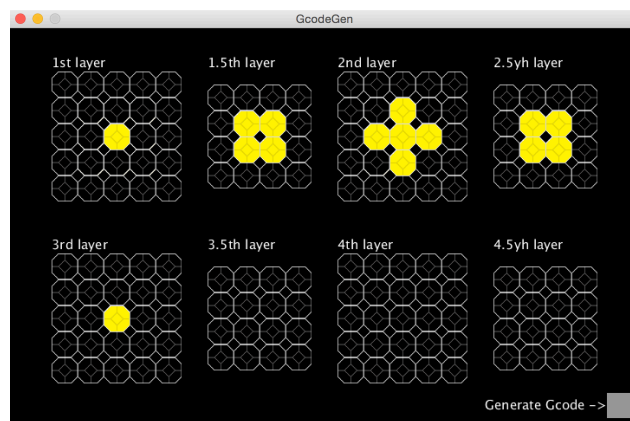


図6 Gコード・ジェネレータ

#### [プロトタイピング]

本システムによる半自動立体試作の有用性を問うために、物質的な文字「フィジカル・タイポグラフィ」と、基本幾何学形状の造形を実際に行った (図7)。



図7 基本幾何形状とフィジカル・タイポグラフィの試作

#### [今後の展開]

これまで実際に造形の対象とした基本幾何形状やフィジカル・タイポグラフィの場合、本システムの3Dアセンブラでなく手で組み立てた方が高速である。ケルビン・ブロックの組立を自動で行える本システムの有用性を示すために、より複雑な形状や大型な形状を対象として造形していきたい。

また、現在の各ケルビン・ブロックの大きさは40mmと大きく、造形物の解像度も荒くなってしまふことから、ケルビン・ブロックを縮小するか、システムの造形可能サイズを拡張することにより解決を図りたい。

#### [参考文献]

- [1] George A. Popescu: Digital Materials for Digital Fabrication, 2007.
- [2] George A. Popescu, Neil Gershenfeld: Digital Materials, 2009.
- [3] Saul Thomas Griffith: Growing Machines, 2004.
- [4] George A. Popescu, Tushar Mahale, Neil Gershenfeld: Digital materials for digital printing, 2007.
- [5] Kenneth C. Cheung: Digital Cellular Solids: reconfigurable composite materials, 2012.
- [6] Joris Laarman: Digital Matter:  
<http://www.jorislaarman.com/digital-matter.html>
- [7] Jonathan D. Hiller, Hod Lipson: Fully Recyclable Multi-Material Printing; Solid Freeform Fabrication Symposium, 2009.
- [8] Jonathan D. Hiller, Hod Lipson: Design and analysis of digital materials for physical 3D voxel printing; Rapid Prototyping Journal, pp. 137-149, 2009.
- [9] Daniel Periard, Evan Malone, Hod Lipson: Printing Embedded Circuits.
- [10] Stefanie Mueller, Tobias Mohr, Kerstin Guenther, Johannes Frohnhofer, Patrick Baudisch: faBrickation: Fast 3D Printing of Functional Objects by Integrating Construction Kit Building Blocks; CHI 2014, pp. 3827-3834.
- [11] Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretière, F., and Baudisch, P: WirePrint: 3D Printed Previews for Fast Prototyping; UIST 2014.