

デジタル・マテリアルを用いた立体形状試作システム

政策・メディア研究科 XD 領域 田中浩也研究室 修士課程二年 関島慶太

[1] 研究背景

3D プリンタや CNC 切削機の普及により、私たちは素材をデジタル制御により複雑に加工することが可能となったが、加工対象の「素材の扱い方」は従来の技術と同様である。例えば、CNC 工作機械の登場によって、木材を複雑に加工してこれまでなかったような形態を生み出すことが可能になったが、「木材を削る」という素材の扱いは、石器時代から変わっていない。つまり、近年デジタル・ファブリケーションと呼ばれる技術は、「制御のデジタル化」にすぎないと言える。

一方で、新しいパラダイムとして言われているのが、「素材のデジタル化」である(図 1)。素材のデジタル化が実現した世界では、「FabLab」の創設者である Gershenfeld が、「FabLab RoadMap」における「Fab3.0」に定めたように、極小のモジュールを機械によって組み立てることであらゆるものがつくられる。モジュールの組立によってつくられたものは、機械による分解を通してもとの素材の状態へと円滑に戻ることができる。また、従来のものづくりでは、ものを「こわす」過程よりも「つくる」過程に重きが置かれてきたが、「素材のデジタル化」が実現すれば、ものを「つくる」過程とものを「こわす」過程が等価に扱われるようになる。

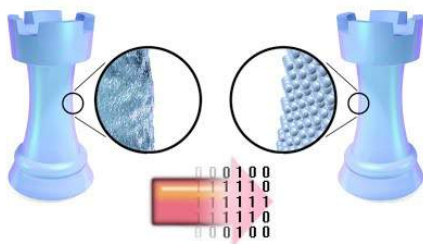


図 1. 素材のデジタル化の概念図

[2] 既往研究

素材のデジタル化の研究は、「デジタル・マテリアル」と呼ばれる分野で行なわれている。例えば、MIT の Gershenfeld が開発した Great Invention Kit (GIK) は正方形を基本とした形状で、各辺の中央にジョイントのための溝が彫り込まれている。パーツの溝同士を嵌め込むことで、複数のパーツを組み立てていくことができる。形状が二次元的であることから容易に量産できることが特徴である(図 2) [3]。

MIT の Cheung は、炭素繊維シートをカットして平面的なモジュールをつくり、それを組み立てることで軽量かつ構造的強度を持った構造体をつくる研究をしている(図 3) [4]。航空機の翼部や陸橋などの巨大構造物への応用が想定されている。

また、Cornell University の Hiller は、直径 1.5mm の球状のモジュールを積層し、その表面を水溶性接着剤の膜で覆うことで、三次元の造形を行う研究をしている。モジュールの種類を増やしやすいため、電子回路のような機能的な造形物をつくることに適している(図 4) [5]。

さらに、オランダ人アーティストの Laarman は、着磁性を持った立方体のモジュールに接着剤を塗りながらロボットアームを用いて組み立てることで、三次元の造形を行うインスタレーションを行っている(図 5) [6]。



図 2. GIK

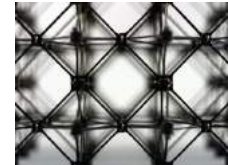


図 3. Cheung による事例



図 4. Hiller による事例



図 5. Laarman による事例

[3] 研究目的

Digital Material の既往研究では、特定の応用領域を想定してモジュールが設計されることが多く、モジュールの分解を機械により円滑に実現した例は見られなかった。また、その結果として、素材のデジタル化の概念は、シンプルに分かりやすく表現されてこなかった。

そこで、本研究では、離散的なモジュールの組立/分解を円滑に繰り返すことのできる三次元造形システムの開発を行う。モジュールの組立によって造形を行った後、モジュールを分解して素材の状態へと循環させることを通して、素材のデジタル化が実現した未来、つまり、Fab3.0 が実現した未来の一端を感じられるシステムを実現する。

さらに、現状のシステムで実現可能な応用可能性および、システムの改善や改良を通して実現可能と考えられる応用可能性を探索する。

[4] 提案システム Ver. 1

[4.1] 設計・開発

組立と分解を等価に行うことの可能なモジュールを実現するために、まずはその形状の検討を行った。モジュールの形状においては、空間充填性の高い方が造形物の形状の自由度が高いということが、Laarman による事例により証明している。さらに、空間充填可能な形状の中でもよりシンプルな形状の方が、機械による組立と分解の操作を実現するためには好ましいと考えられる。そこで、単一種類による空間充填が可能な五種類の一様多面体を候補として取り上げ、それぞれを比較検討した結果、切頂八面体を最適な形状として選択するに至った。



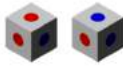
表 1. 空間充填可能な一様多面体の比較検討

		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

モジュールの形状の次に検討したのが、モジュール同士をつなぐための接合機構である。既往研究で用いられている三種類の接合方式を、組立/分解時の円滑性の観点から比較すると、表 2 のようになる。三つの方式のなかでは、Magnet方式が最も可能性を感じさせるが、磁石はS極とN極同士でしか接合しないという絶対的なルールが存在することから、必ずしも円滑に組立と分解を実現できるとは限らない。特に、モジュールの各面に磁石を直接埋め込む場合、モジュールの形状が空間充填形であっても磁石の反発によって造形できない形状が発生する可能性が高い。そこで、本研究では、図 6 のように磁石を用いながらも磁極の向きを考慮を必要としない独自の接合機構を開発した。また、この接合機構を切頂八面体の各面に搭載したモジュールを、「Kelvin Block Ver. 1」と名付けた(図 7)。大きさは、外径寸法 40mm である。

Kelvin Block Ver. 1 は、切頂八面体の形状的な性質に、磁石の接合機構が加わったことにより、組み立て中に生じる誤差を修正する機能も持つ。これによって、組立時には、必ずしも高精度な操作でなく、ピック・アンド・ドロップのような多少粗い動作であっても、正確な組み立てを行うことができる。

表 2. 既往研究におけるモジュールの接合方式

	Press-Fit	Bonding	Magnet
Type of joint			
Smoothness of assembly/disassembly	Poor	Very poor	Good

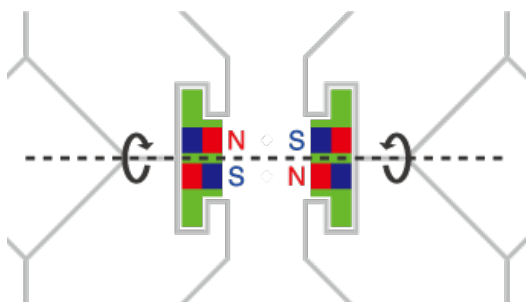


図 6. 開発した接合機構



図 7. Kelvin Block Ver. 1

なお、本研究においてモジュールの形状として採用した切頂八面体は、充填した際に得られる中心点の配置が、代表的な分子構造の「体心立方格子構造」という点でも非常に興味深い(図 8) [7]。SF 作品に描かれるような、分子を組み立てることであるゆるものをつくることのできる可能な機械がもし実現したとすれば、造形物の分子構造は、Kelvin Block Ver. 1 の組立によって得られた造形物と同様となるのである。

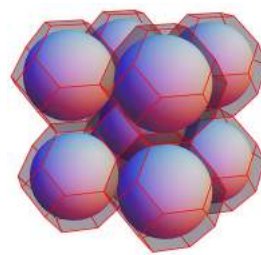


図 8. 切頂八面体による充填と体心立方格子構造

次に、Kelvin Block Ver. 1 の組立/分解を自動化する機械の開発に取り組んだ。デルタ型の 3D プリンタの筐体をベースに、ブロックをピック・アンド・ドロップする「Picker」と、ブロックを一つずつ送り出す「Separator」の二つの機構を実装し、これらを統合した機械を「3D Assembler/Disassembler Ver. 1」とした(図 9)。3D Assembler/Disassembler Ver. 1 の開発に至るまでに二つの機械の開発を行ったが、ここでは割愛する。

Picker と 3D プリンタの筐体部分は、Arduino 互換基板の「RAMBo」に接続し、Separator は Arduino MEGA に接続されており、それぞれ、G コードと呼ばれる機械言語によって制御されている。造形に必要な G コードは、造形物の形状ごとに異なるため、任意の形状の造形に必要な G コードを生成することのできるツールとして、「G-Code Generator」を開発した。造形の際には、G-Code Generator で生成した G コードを、3D プリンタのホストソフトウェア「Repetier」に取り込んで実行することで、ブロックの組立が行われる。

また、Picker に取り付けられている磁石が、ブロックの接合機構に取り付けられている磁石よりも強い吸着力となっていることから、ブロックの分解も 3D Assembler/Disassembler Ver. 1 によって行うことができる。ただし、G-Code Generator には、分解時の G コードを生成する機能が実装されていないことから、分解の際には G コードを直接 Repetier に入力する必要がある。

以上の Kelvin Block Ver. 1 を 3D Assembler/Disassembler Ver. 1 によって円滑に繰り返し組立/分解することで任意の三次元形状の造形を行うことのできるシステムを、本研究では提案システム Ver. 1 とする。

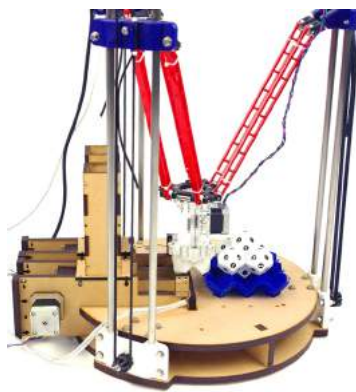


図 9. 3D Assembler/Disassembler Ver. 1

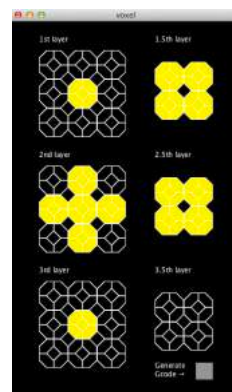


図 10. G-Code Generator

[4. 2] 造形実験・評価

本システムの造形性を明らかにするため、はじめに、アルファベットと数字を造形対象として取り上げて造形を行った(図 11)。アルファベットや数字の中には、オーバーハングや左右非対称な形状など多様な形状が含まれており、システムの造形性を示す上で適していると考えたためである。

形状の不安定な文字は組立の途中で失敗することもある

たものの、組立のスピードを遅くすることや、組立の順番を工夫するなどして、全ての形状を 3D Assembler/Disassembler Ver. 1 により組み立てることができた。

次に、より多くのブロックを用いた形状として、立方体、三角錐、八面体、円環体の四種類の基本幾何形状を取り上げて造形を行った(図 12)。各形状の表面の滑らかさは、Kelvin Block Ver. 1 の大きさと、3D Assembler/Disassembler Ver. 1 の造形可能範囲に依存するため、このように表面は凸凹のある状態となる。



図 11. Physical Typography

図 12. 基本幾何形状

次に、本システムを用いて、どのくらいのブロックの数に対して、どのくらいの造形時間を要するかを明らかにするために、実験を行った。今回対象としたのは、図 12 で取り上げた四種類の基本幾何形状である。実験の結果は表 3 のようになった。

例えば、八面体と円環体の造形結果からは、約 2 分の間に造形できるブロックの個数は、20 個前後であることがわかる。現在のシステムで実現できる造形物表面の滑らかさは限られており、切頂八面体の凹凸が目立った状態となることから、既存する他の三次元造形手法との具体的な比較は難しいものの、やはり、まとまったボリュームを持ったブロックを積み重ねることで造形を行う本システムの手法では、形状によっては早い速度で造形を実現できるのではないかと考えられる。

表 3. 基本幾何形状の組立時間とブロック個数

目的形状	組立時間	ブロック個数
立方体	2分 59秒	27
四角錐	1分 35秒	14
八面体	2分 6秒	19
円環体	2分 9秒	20

また、本システムを用いてどの程度不安定な形状の造形を行えるかについては、検証の余地が残されていた。そこで、本システムによる造形において最も不安定の予想される、水平方向へブロックを連結した場合を対象とし、何個までブロックを連結可能であるか実験を行った。Kelvin Block Ver. 1 の接合機構に用いる円筒型ネオジウム磁石を、ボリュームと吸着力の異なる複数のパターンを用意し、それぞれの場合において連結可能なブロックの個数を調べた結果、表 4 のような結果が得られた。通常、Kelvin Block の接合機構に用いている磁石は、表 4 のうち一番右側の、直径 3mm、高さ 4mm のものであり、水平方向へは 3 個までブロックを接続可能であることがわかる。

なお、現在のブロックの設計では、直径 3mm、高さ 4mm が、

用いることのできる磁石のボリュームとしては最大である。現在の回転式の接合機構を踏襲したまま、より強い吸着力を持った大型の磁石を用いる場合には、ブロック自体を大型化するしか方法はない。

表 4. 水平方向への接続可能個数の検証

磁石のボリューム (φD(mm)*H(mm))	3*1	3*2	3*3	3*4
磁石の吸着力 (kgf)	0.17	0.26	0.31	0.34
水平方向への 接続可能個数(個)	2	2	3	3

[4.3] 考察

提案システム Ver. 1 の開発を通して、ブロックの組立と分解を円滑に繰り返すことのできるシステムが実現した。

しかし、同時にシステムの開発を通して多くの課題も明らかとなった。まず、システムを用いて組立と分解を繰り返すことのできるブロックの最大個数は 12 個にとどまっている。

また、素材のデジタル化が実現した未来を体感できるようなシステムとするためには、現在の外径寸法 40mm のブロックの大きさでは難しいと考えられる。XD Exhibition 2015 でシステムの展示とデモムービーの上映を行った際には、来場者にとって素材のデジタル化が実現した未来の世界を想像する上で、ブロックの大きさがひとつの制約となっていることを実感した。そこで、提案システム Ver. 2 では、組立/分解に用いることのできるブロックの個数を増やすと同時に、ブロックの小型化に取り組む。

[5] 提案システム Ver. 2

[5.1] 設計・開発

従来の半分の大きさにあたる外径寸法 20mm のブロックとして、Kelvin Block Ver. 2 をデザインした。形状は以前と同じく切頂八面体であるが、接合機構はブロックの縮小に伴って従来の回転式の機構を踏襲することができないため、各面に磁石を直接埋め込む方法をとっている。図 13 での青色と赤色は磁石の S 極と N 極を示している。図 14 のとおり実際に製作したものである。ネオジウム磁石の金メッキと Ni メッキの二種類の表面処理によってこれらを区別している。

ブロックの磁石の埋め込み方のパターンはこの通り一種類であるが、組立の際には、90 度回転したものと、回転しないものの二種類の向きを扱いながら、隣り合うブロックは異なる向きとなるように配置していく必要がある。

磁石をモジュールの各面に直接埋め込む方法では、S 極と N 極の向きを確認しながら組立を行う必要があるため、従来のように円滑な組立と分解は実現できない場合があるが、図 15 から分かるように、二種類あるブロックの向きは比較的理解しやすくなっている。

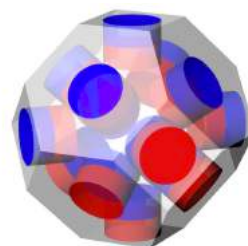


図 13. Kelvin Block Ver. 2



図 14. 実際に製作した Kelvin Block Ver. 2

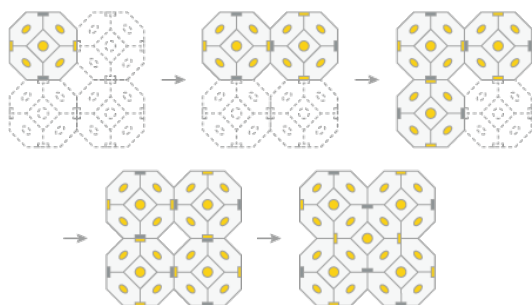


図 15. Kelvin Block Ver. 2 の組立プロセス (上面図)

次に、Kelvin Block Ver. 2 の組立/分解を円滑に自動化するための機械として、3D Assembler/Disassembler Ver. 2 を開発した (図 16)。今回は Kossel 型の 3D プリント「Kossel mini K800」をベースとしているが、ブロックをピック・アンド・ドロップする Picker と、ブロックを一つずつ送り出す Separator の基本的な機構の構成は前回と変わらない。

3D Assembler/Disassembler Ver. 1 同様 Separator は二台設置している。前回は、組立に用いることのできるブロックの個数を増やすという目的が理由であった。しかし今回は、それだけではなく、小型化して新しくなった接合機構では組立の際にブロックの向きが二種類発生することから、その向きごとに Separator が二台に分かれている。前システムと比較すると、組立と分解の繰り返しに用いることのできるブロックの個数が 12 個から 30 個に増えているほか、ブロック小型化したことにより造形できる形状の幅が広がっている。



図 16. 3D Assembler/Disassembler Ver. 2

3D Assembler/Disassembler Ver. 2 は、ステージ部の裏側に Arduino MEGA と RAMPS のセットを二つ搭載している。一方は、Picker を含む Kossel 型 3D プリントの筐体を制御するためのものであり、もう一方は、二台の Separator を制御するためのものである。いずれも、PC からシリアル通信により G コードを送信することで造形に必要な動作を実現している。

また、3D Assembler/Disassembler Ver. 2 により任意の三次元形状を組立/分解するための操作を行う「Control Software」を Processing で新たに実装した (図 17)。2D ビュー上で Kelvin Block Ver. 2 を配置する場所を選択することで造形する形状を設計しながら、3D ビュー上で造形結果を確認できることから、従来の G-Code Generator に比べて直感的な操作が可能となっている。造形物はマウスのドラッグによって任意の向きに回転させることもできる。また、造形に必要な G コードを 3D Assembler/Disassembler Ver. 2 に搭載された二セットの制御基板に直接送信することが可能であり、従来の冗長なフローを解決している。

以上の Kelvin Block Ver. 2 を 3D Assembler/Disassembler Ver. 2 によって円滑に繰り返し組立/分解することによって任意の三次元形状の造形を行うことのできるシステムを、本研究では提案システム Ver. 2 とする。

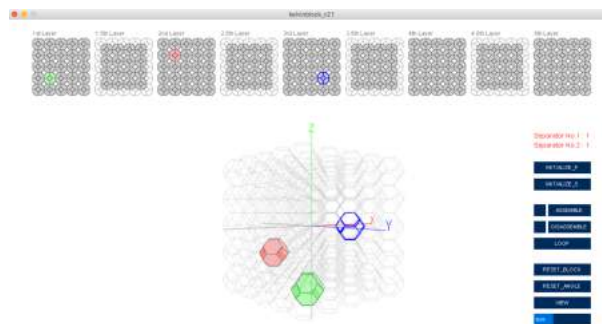


図 17. Control Software

[5.2] 造形実験・評価

提案システム Ver. 2 は完成したものの、実際に小型化したブロックを用いてどのような形状を造形できるかについては探索の余地があった。そこで、ブロックを約 80 個用いた場合にどのような形状を造形できるか、ブロックを手で組み立てながらスタディを行った (図 18)。造形した形状の中には、3D Assembler/Disassembler Ver. 2 の造形可能範囲を超える大きさのものや、オーバーハング形状のため造形が難しいものもあるが、形状を分割して後から手で結合する方法をとればいずれも実現可能である。また、実際には二台の Separator にセットできるブロックの個数は合計 30 個程度であるが、組立のみを目的とし Separator に必要に応じて手でブロックを投入することを許せば、こうした多数のブロックを用いた形状も造形可能である。



図 18. 約 80 個のブロックを用いたスタディ

また、これまで造形してきた Physical Typography や基本幾何形状のような抽象的なモチーフではなく、ディテールが重要となる具体的なモチーフを造形する場合には、どの程度のブロックの個数で、造形物の表面滑らかさはどの程度確保できるのかを調べるため、Stanford Bunny を造形対象として取り上げ、スタディを行った。

3DCAD の「Rhinceros」とそのプラグインでパラメトリックに 3D モデルの編集を行うことのできる「Grasshopper」を用いて、Stanford Bunny を造形した場合の CG を作成し、造形物の表面の滑らかさと形状の認識の関係について観察した。CG の作成においては、田中浩也研究室の對馬尚の協力を得た。

その結果得られた CG の一覧が、図 19 である。左から右に向かって、造形に用いるブロックの個数が増して行く。ブロックのサイズは固定されているので、当然ながら、用いるブロックの個数が増えるごとに造形物全体のサイズも大きくなって行く。CG の下に書かれた数字が、用いているブロックの個数である。造形した形状が「ウサギのようなもの」であるという大まかな認識は少数のブロックによる造形からでも可能であるが、その輪郭をはっきりと認識できるためには、1000 個を超えるブロックを用いなければ難しいことが分かる。

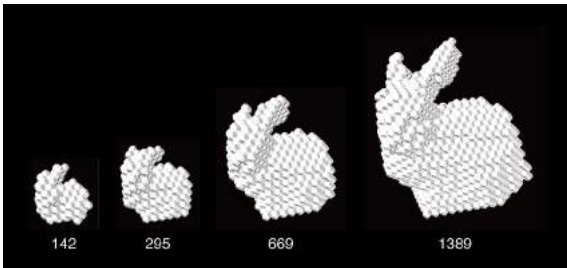


図 19. 造形物の解像度のスタディ

次に、提案システム Ver. 2 を用いて造形を行う際に、どのくらいの大きさの造形物に対して、どのくらいの造形時間を要するのかを明らかにするため、四種類の基本幾何形状を再び対象として、組立および分解にかかる時間の測定を行った（図 20）。

また、その結果を提案システム Ver. 1 における組立時間も合わせて表 5 にまとめた。提案システム Ver. 1 では、二台の Separator にセットできるブロックの個数が最大 12 個に限られており、これらの形状の分解まで自動化することができなかったことから、測定したのは組立時間のみとなっている。

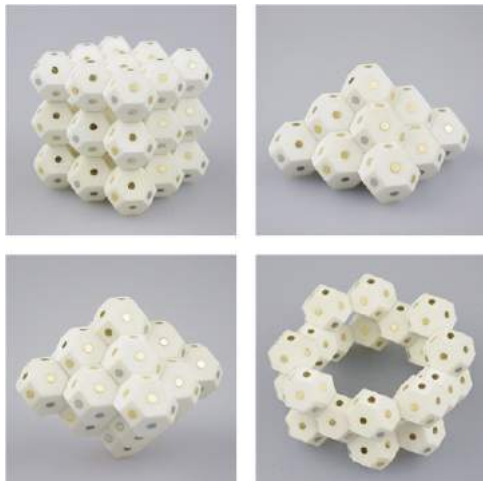


図 20. 3D Assembler/Disassembler Ver. 2 により造形した基本幾何形状

この結果から、提案システム Ver. 2 においては、組立よりも分解にやや多くの時間を必要とするものの、ほぼ同じ時間内で組立と分解を行えることが分かる。現在は分解にやや多くの時間がかかっているが、Control Software の設定を最適化すれば、その差を解消することも可能であると考えられる。素材のデジタル化に基づくものづくりにおける、「つくる」過程と「こわす」過程を同じコストで実現できるという性質は、組立と分解にかかる時間的コストがほぼ同等であるこの測定結果からも再確認できる。

また、提案システム Ver. 1 の方が提案システム Ver. 2 よりも組立にかかる時間が非常に短くなっているが、これは Separator の制御方法が異なるためである。提案システム Ver. 1 では、マイクロスイッチが Picker によって押される度に Separator がブロックを押し出す仕組みであり、Separator は PC との通信は行わず単独で動作していた。つまり、Picker と Separator は、一方が動作している間もう一方が停止するようなことはなく、同時並行的に動作していた。それに対して、提案システム Ver. 2 では、新たに実装した Control Software を用いて、Separator も Picker と同じく PC からのシリアル通信により G コードを送信することで制御している。そのため、Separator が動作している間、Picker は停止している状態となり、従来に比べて動作の安定性は高まったものの、造形にかかる時間が提案システム Ver. 1 に対して長くなっている。

なお、今回の実験を行う上で組立や分解の際に何度かブロックの位置や向きがずれるエラーが起きることがあったが、その際は筆者が手でブロックの位置や向きを修正するなどの対応を行うことで造形を続行した。現状のシステムでは、造形の安定性がまだ完全ではなく、今後も改善や改良が必要であると言える。

表 5. 基本幾何形状の造形時間とブロック個数

	提案システム		
	Ver. 1	Ver. 2	
	組立時間	組立時間	分解時間
立方体	2 分 59 秒	6 分 25 秒	6 分 49 秒
四角錐	1 分 35 秒	3 分 23 秒	3 分 33 秒
八面体	2 分 6 秒	4 分 34 秒	4 分 48 秒
円環体	2 分 9 秒	4 分 47 秒	5 分 3 秒

[5.3] 考察

提案システム Ver. 2 の開発を通して、素材のデジタル化の概念をこれまでよりもある程度現実感を伴ったものとして表現できるようになったと感じる。従来のシステムでは、ブロックの組立と分解を繰り返すことのできる形状が非常に限定的であり、FabLab RoadMap における Fab3.0 や、SF 作品で描かれる素材のデジタル化が実現した未来へと想像を展開することが難しかった。それに対して提案システム Ver. 2 では、約 80 個のブロックを用いて造形できる形状を探索したスタディの結果から分かる通り、造形できる形状の幅が広がったことにより、ものづくりのツールとしての実用化も視野にいれた議論を行うことができるようになった。

一方で、基本幾何形状のような抽象的な形状ではなく、表面のディテールが再現されなければ認識できないような具体的な形状の場合には、現状のシステムで組立/分解できるブロックの個数/大きさではやはり不十分であるとも言える。また、造形時間の測定を行った際にエラーが起こっていたように、まだ安定性の観点では改善や改良な部分がある。

組立/分解する形状によってエラーの起こりやすさも異なるため、どのような形状の場合エラーが起きやすいかについても明らかにしていきたい。

[6] 応用可能性

[6.1] Lo-Fi Prototype

近年、デジタル・ファブリケーションの研究分野において、低解像度で高速に試作を行う「Lo-Fi Prototype」と呼ばれる試みが行われている(図 21) [8]。本システムは、3D プリンタのような完成度を伴う試作には不向きであるが、手に取った時のサイズ感やプロポーションといった概略的な情報を得ることが目的となる Lo-Fi Prototype との親和性は非常に高いと言える。

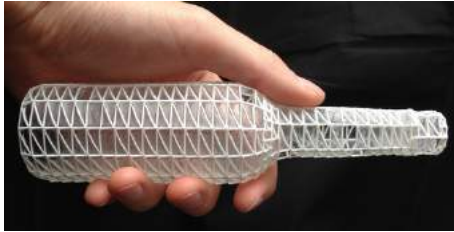


図 21. 「WirePrint」

[6.2] 都市模型の制作

都市デザインのワークショップなどで、都市模型を LEGO ブロックにより制作する事例が増えている(図 22) [9]。Kelvin Block Ver. 2 は LEGO ブロックと同じサイズ感でありながら、機械により円滑に組立/分解できるという LEGO ブロックにはない魅力的な特徴も備えていることから、都市模型の制作において有用なツールとなる可能性がある。



図 22. LEGO ブロックを用いた都市模型の制作

[6.3] 機械と人間の協調 (Interactive Fabrication)

3D Assembler/Disassembler Ver. 2 は、デルタ型 3D プリンタをベースとした開放的な構造となっており、人が手を伸ばして造形に介入することを可能にしている。そのため、Interactive Fabrication 等の分野で行われている研究のように、造形を全て機械に任せるのではなく、その一部を人間が担うことで、機械と人間の協調による造形を実現できる可能性がある(図 23)。



図 23. 機械と人間の協調による造形のイメージ

[6.4] 電子回路の造形

Kelvin Block Ver. 2 の内部に LED やアクチュエータを埋め込むことで、三次元の電子回路を造形する方向性にも大きな可能性を感じる。実験的に、切頂八面体のモジュールの内部に電池や銅線、LED を埋め込むことで電子回路を構成したところ図 24 のように LED の青い光が美しく広がった。



図 24. 電子回路の造形のイメージ

[6.5] フィジカルなディスプレイ

これまで数字や文字の情報の表示に用いられてきた一般的な「ディスプレイ」では、画面上に表示された情報を人間が視覚的に認識するという関係性が当たり前とされてきたが、三次元の形状をブロックの組立/分解により表現できる本システムを「フィジカルなディスプレイ」と解釈すれば、造形した数字や文字を手にとって触るといった新たな体験が実現できる可能性がある(図 25)。

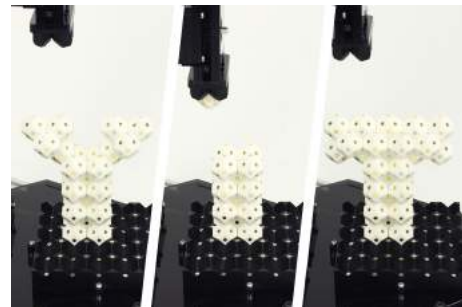


図 25. フィジカルなディスプレイのイメージ

[7] 発表実績

本研究は以下の二つの学会に投稿し、いずれも受理された。

- 日本バーチャルリアリティ学会、論文誌、フルペーパー、Vol. 20, No. 2, 2015.
- ACM SIGGRAPH 2015、ポスターセッション

[8] 参考文献/画像引用元

1. Replicator: <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%B1%E3%83%BC%E3%82%BF%E3%83%BC>
2. Microbot: <http://disney.wikia.com/wiki/Microbots>
3. George A. Popescu: Digital Materials for Digital Fabrication, 2007.
4. Kenneth C. Cheung: Digital Cellular Solids: reconfigurable composite materials, 2012.
5. Jonathan D. Hiller, Hod Lipson: Fully Recyclable Multi-Material Printing; Solid Freeform Fabrication Symposium, 2009.
6. Joris Laarman: Digital Matter: <http://www.jorislaarman.com/work/digital-matter/>
7. Lee Research Group: <http://homepages.rpi.edu/~lees27/jigsaw.html>
8. WirePrint: <https://hpi.de/baudisch/projects/wireprint.html>
9. MIT Media Lab Changing Places group: <http://cp.media.mit.edu/>