

プラトン立体型インタフェースを用いた集合演算による 形状パターンの生成

中野亜希人^{†1} 脇田玲^{†1}

コンピュータグラフィックスの三次元モデルを実空間で編集するインタフェースの研究が盛んである。このインタフェースのデザインは、モデリングの起点となる基本形状を物質化する手法と、造形や工作の道具を電子化する手法に大別される。しかし、近年の三次元スキャニング技術の精度や速度の進歩は目覚しく、ユーザの変形操作を翻訳するための計算機化インタフェースの恩恵は薄くなりつつある。コンピュータの高速な計算力を用いた、ユーザの創造性を広げるための計算機支援インタフェースの開発が必要であろう。そこで筆者らは、プラトン立体型インタフェース同士の集合演算によって形状パターンを生成するシステムを開発している。複数の立体が干渉し合う状況では、ユーザは和や差、積といった集合演算の結果を想像できない場合が多い。コンピュータはそのような形状の可能性を提示することで、ユーザに新たな形状の発見を促す。

Shape Generation by Boolean Operations between Platonic Solids

AKITO NAKANO^{†1} AKIRA WAKITA^{†1}

In recent years, researches on the interface have been getting popular, which helps designers to edit shapes of 3D computer graphics models in the physical world. Design of these interfaces falls into two approaches; materialization of virtual primitive shapes and computerization of hand tools. However, these interfaces are getting lower benefits because the precision and speed of 3D scanning technology is making rapid progress. The computational interface is necessary to expand our creativity with the use of fast computation. Therefore, we have developing the system which generates shape patterns by the boolean operations between platonic solids. When multiple objects intersect each other, the interference or removed shape is often unexpected for designers. Computers aid shape discovery of designers, showing the possibility of shapes.

1. はじめに

コンピュータグラフィックスの三次元モデルを実空間で編集するインタフェースの研究が盛んである。このインタフェースのデザインは、モデリングの起点となる基本形状を物質化する手法と、造形や工作の道具を電子化する手法に大別される。前者の例として MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) [1][2][3]、布[4][5]や磁性ゲル[6]の形を操るインタフェースが挙げられる。これらはそれぞれ、ポリゴン、パラメトリック曲線や曲面、陰関数曲面によるモデリングに対応している。一方、グラインダー型インタフェース[7]、粘土状インタフェース[8]といったデジタル入力を持つハンドツールが後者に当たる。クレイモデラー[9]と併用することでユーザは彫刻をするように三次元モデルを削ったり、凹凸を作ったりすることができる。

近年の三次元スキャニング技術の精度や速度の進歩は目覚ましい。ユーザは人工物を三次元モデルに即座に変換することができる。そのため既存の試みのような、ユーザの変形操作を翻訳するための計算機化 (*computerized* な) インタフェースの恩恵は薄くなりつつある。コンピュータの高速な計算力を用いた、ユーザの創造性を広げるための計算機支援 (*computational* な) インタフェースの開発が必要であろう[10]。そこで筆者らは、プラトン立体型インタフ



図 1 形状パターン生成システム ASOM2
Figure 1 Shape-pattern generation system "ASOM2"

ース同士の集合演算によって形状パターンを生成するシステム ASOM2 (Augmented Solid Modeler 2) を開発している[11] (図 1)。ユーザは、大型マルチタッチディスプレイ上に四面体、六面体、八面体、十二面体、二十面体の五種類のインタフェースを実際に組み合わせ、形状の原型を作る。コンピュータはその原型を読み取り、集合演算で様々な形状パターンを生成する。複数の立体が干渉し合う状況では、ユーザは和や差、積といった集合演算の結果を想像できない場合が多い。コンピュータはそのような形状の可能性を提示することで、ユーザに新たな形状の発見を促す。形状パターンの生成においては、遺伝的アルゴリズム[12]

^{†1} 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
【研究報告用原稿：上記*の文字書式「隠し文字」】

やアルゴリズムミックデザイン[13]の試みと異なり、原型をフィジカルなインタフェースで入力する点が特徴である。

以下では第2章で本研究を始めるに至った筆者らのモチベーションとASOM2のコンセプトについて述べ、読者と意見を交わす機会としたい。第3章に、プログラマブルマターやマテリアルコンピューティングに関連する研究と本研究との差異について述べる。ASOM2を使った形状パターンの生成例を第4章に示す。システムについては第5章で概説する。最後に第6章でまとめと今後の展望について述べる。

2. モチベーションとコンセプト

頂点、稜線、面で構成される三角形ポリゴンは、三次元コンピュータグラフィックスを構成する最小の単位である。三角形ポリゴンに還元され得る立方体や円柱、球などは基本形状と呼ばれている。ユーザは、基本形状を変形して複雑な形状をモデリングしてきた。しかし、法線情報を持たずシェーディングされていない三角形ポリゴンを持つ形状は、正常な三次元コンピュータグラフィックスとしての市民権を得られず、その美しさを吟味する前段階で除去の対象となってしまうことも少なくない。我々の創造性はポリゴン還元主義の統治下にあったと言える。そこで筆者らは人間の創造性を解き放つために、既存の三次元コンピュータグラフィックスの基本形状から離れ、三角形ポリゴンの破綻も容認した形状パターン生成の試みを始めるに至った。本稿は、この試みの中間報告という位置づけである。本稿を通じて、読者と意見を交わす機会を設けたい。

プラトンは著書「ティマイオス」にて、自然界の元素を司るプラトン立体を記している。科学的ではないにしろ、鋭く尖って皮膚に刺さるような四面体を火の元素に、平らな面に安定していて重そうな六面体を土の元素に、火の元素よりも球に近く転がりやすい八面体を風に、最も球に近い二十面体を水の元素に、美しい対称性を持つ十二面体を宇宙に準える発想は素朴で生々しい。筆者らは、このようなプラトン立体を最小単位としたモデリングがユーザの創造性や直感性に貢献するかもしれないと考えている。例えばユーザは、四面体を炎が昇るように積み上げて熱い形状を、二十面体を無造作に転がして滑らかで冷たい形状を作るかもしれない。プラトン立体の集合演算は複合的な性質を持った形状の表現に応用できる可能性がある。ASOM2のコンセプトは、こうしたプラトン立体を最小単位とした集合演算で、ポリゴン還元主義に挑戦することである。

3. 関連研究

近代科学の歴史は、不変で分割不可能な最小単位の構造的、化学的究明に他ならない。例えば物理学においては、原子の構造や結合法則の研究が進められている。生物学ではデオキシリボ核酸の二重螺旋構造や塩基配列を研究して

いる。プログラマブルマターやマテリアルコンピューティングといった実空間における形状構築技術の研究は、このような近代科学の延長線上にある。以下では、それらと本研究との差異について人間の創造性という観点から述べる。

3.1 プログラマブルマター

実空間における形状構築技術の一つであるプログラマブルマターが注目を集めている。Goldsteinらは小型モジュラーロボットの連結を制御し動的に形状を構築する技術であるクレイトロニクスを研究している[1]。M-TRANは、三次元的な配置を自律分散的に組み換え、変形、移動するモジュラーロボットである[2]。Zykovらは、実空間でセルオートマタを形成するモジュラーロボットを実現している[3]。しかしプログラマブルマターによる形状構築は、モジュラーロボットが予め持つ連結部以外での合体を考慮していない。ユーザの創造性は、機械的な結合で表せる形状に制約されてしまう。本研究のプラトン立体型インタフェースは、稜線と頂点だけで構成されたワイヤーフレームモデルを実体化した中空の形状である。ユーザは様々な位置や角度でインタフェースを干渉させることが可能である。

3.2 マテリアルコンピューティング

コンピュータグラフィックスの三次元モデルを実空間で編集するインタフェースの研究として、マテリアルコンピューティングが挙げられる。メタボール[14]を実空間に拡張したBlob Manipulation[6]は、磁性ゲルの形を攪拌棒のジェスチャー入力で制御するシステムである。粘弾性体の生み出す滑らかな曲面は、有機的な曲面を持つ建築物への応用が期待される。SMAAD Surface[5]は、抵抗熱に応じて曲がるバイオメタルを搭載した布状インタフェースである。ユーザがこのインタフェースを曲げたり捻ったりすると、自由曲面も連動して変形する。一方で、近年の三次元スキャニング技術の精度や速度の進歩によって、ユーザは人工物を三次元モデルに即座に変換することができるようになった。そのため、既存の試みのようなユーザの変形操作を翻

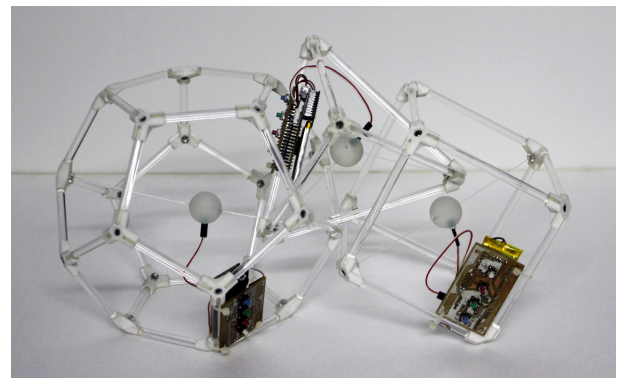


図2 四面体型と十二面体型インタフェースの間に挟み、四面体型インタフェースを宙に浮かせた原型。

Figure 2 Tetrahedron interface is above the ground, as sandwiched in between hexahedron and dodecahedron interface.

訳するための計算機化 (computerized な) インタフェースの恩恵は薄くなりつつある。本研究では、ユーザが作った形状の原型を元にコンピュータが様々な形状パターンを生成する。複数の立体が干渉し合う状況で、ユーザは和や差、積といった集合演算の結果を想像できない場合が多い。コンピュータはそのような形状の可能性を提示することで、ユーザに新たな形状の発見を促す。

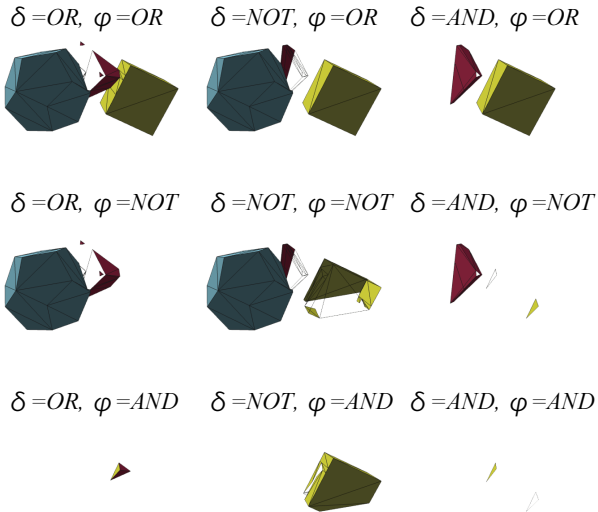


図3 集合演算 $(D \delta T) \varphi H$ の形状パターン。図中の OR は和, NOT は差, AND は積の集合演算を示す。

Figure 3 The result of boolean operation $(D \delta T) \varphi H$.

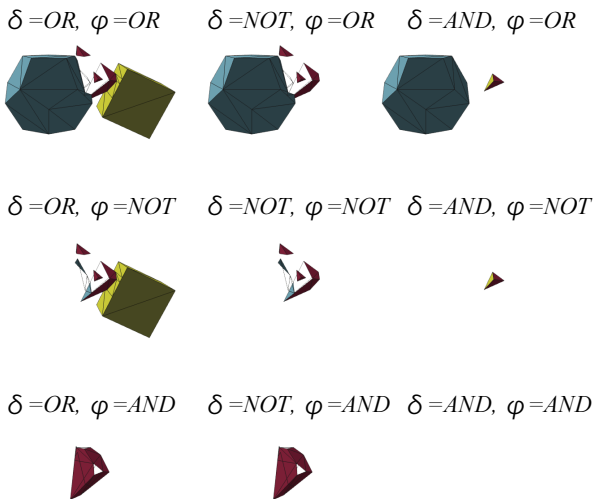


図4 集合演算 $(T \delta H) \varphi D$ の形状パターン。 $\delta=OR, \varphi=AND$ の場合と $\delta=NOT, \varphi=AND$ の場合は類似した形状が提示された。 $\delta=AND, \varphi=AND$ の場合のように形状が消滅してしまう場合もある。

Figure 4 The result of boolean operation $(T \delta H) \varphi D$. The patterns generated from $\delta=OR, \varphi=AND$ and $\delta=NOT, \varphi=AND$ end in much the same way. Sometimes the result disappears e.g. $\delta=AND, \varphi=AND$.

4. ASOM2 による形状パターン生成

ASOM2 は、ユーザがプラトン立体型インタフェースで作った原型に集合演算を実行し、様々な形状パターンを提示する。以下では、四面体型、六面体型、十二面体型の三つで原型を作った場合の形状パターンについて述べる。ユーザは、プラトン立体型インタフェースを手を持ち、それを傾けたり、他のプラトン立体型インタフェースで挟み込んだりすることができる。図2に、六面体型と十二面体型インタフェースの間に挟み、四面体型インタフェースを宙に浮かせた原型を示す。コンピュータはこの原型を元に、集合演算を実行する。四面体型インタフェースを T、六面体型インタフェースを H、十二面体型インタフェースを D とした場合の形状パターンを図3に示す。また、例えば $D NOT T$ と、 $T NOT D$ のように、差の集合演算は引数の順番によって結果が異なる。ASOM2 では、ランダムに引数を並び替え同じ原型から異なる形状パターンを生成することが出来る (図4)。

5. システム概要

ASOM2 はプラトン立体型インタフェース、物体検知ミドルウェア、形状パターン生成ソフトウェアの三部から構成される。プラトン立体型インタフェースは四面体、六面体、八面体、十二面体、二十面体の五種類あり、それぞれに電子回路が装備されている (図5)。ユーザは任意のプラトン立体型インタフェースを大型マルチタッチディスプレイ (SHARP 製 PN-T322B) 上に組み立てる。タッチディスプレイ面から約 5[mm] を空けて貼った透明なアクリル板は、その上に置くプラトン立体型インタフェースとユーザのマルチタッチとの誤動作を防止している。物体検知ミドルウェアでは、プラトン立体型インタフェースの位置と回転角度を取得する。この手順を以下に示す。まず、タッチディスプレイの側方に置かれた Kinect センサーの RGB カメラと深度カメラの画像を処理することで、プラトン立体型インタフェースの XYZ 座標を取得する。次にプラトン立体型インタフェースの電子回路基板に換装されている IMU

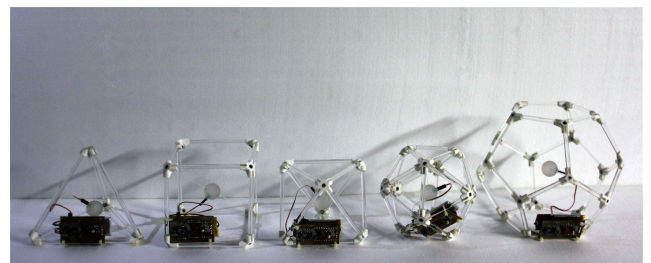


図5 プラトン立体型インタフェース。左から、四面体、六面体、八面体、二十面体、十二面体である。

Figure 5 Platonic solids interfaces. Starting from the left, tetrahedron, hexahedron, octagon, icosahedron and dodecahedron interface.

(Inertial Measurement Unit) センサーより無線通信で回転角度を取得する。これらのデータは WebSocket 経由で形状パターン生成ソフトウェアに送られる。形状パターン生成ソフトウェアでは、受信したデータを元に三次元モデルを再構築した上で、ランダムに集合演算を実行し、形状パターンを提示する。ユーザは任意の形状パターンを指で選択し、回転させて様々な角度から形状を確認することが出来る。以下ではまずプラトン立体型インタフェースについて 5-1 項で述べる。物体検知ミドルウェアについて 5-2 項で、形状パターン生成ソフトウェアについては 5-3 項で述べる。なお、物体検知ミドルウェアと形状パターン生成ソフトウェアの開発環境、実行環境は、Windows 7 OS(64bit), RAM 4.00GB, Intel® Core™ i5-2467M CPU 1.6GHz である。

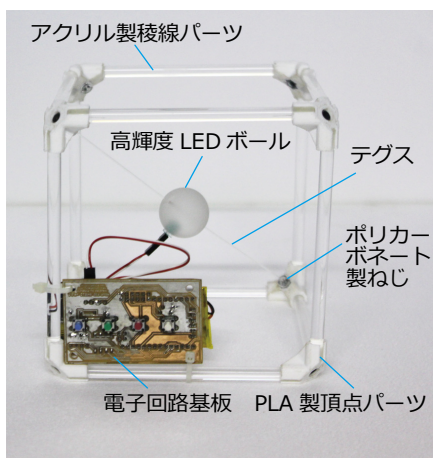


図 6 プラトン立体型インタフェースの構成 (六面体の例).
Figure 6 The configuration of hexahedron interface.

5.1 プラトン立体型インタフェース

プラトン立体型インタフェースは、PLA 製頂点パーツとアクリル製稜線パーツ、高輝度 LED ボール、テグス、ポリカーボネート製ねじ、電子回路基板で構成されている (図 6)。高輝度 LED ボールは、高輝度砲弾型で直径 5[mm]の LED (緑色) を直径 25[mm]のアクリル球に差し込んだ部品である。アクリル球にはサンドブラスト加工を施している。表面が曇っているため、高輝度緑色 LED の光はアクリル球全体に広がる。また、同アクリル球には $\phi 1$ の貫通穴を開け、テグスを通して。テグスの一方の端にはポリカーボネート製ねじ (M4) が固定されている。もう一方は、ポリカーボネート製ねじの軸中心に開けた穴にテグスを通し、結び目を作っている。こうすることで、ポリカーボネート製ねじを回してテグスを張る際に、テグスが振れない。PLA 製頂点パーツには、鬼目ナット (M4) を熱圧入した。アクリル製稜線パーツは透明度が高い $\phi 6$ のアクリル棒の両端を旋盤で約 0.1[mm]細く加工した部品である。

電子回路基板は、Arduino FIO, リチウムイオンポリマー電池 (DC 3.7[v], 850mAh), IMU センサーとスイッチが換

装されている。IMU センサーは、三軸加速度センサー (ADXL345) と三軸ジャイロセンサー (ITG-3200) を搭載し回転角度を検出している。ユーザは、電子回路基盤の白色のスイッチを押すことで高輝度 LED ボールを点灯することが出来る。赤色のスイッチは和の集合演算の、緑色のスイッチは差の集合演算の、青色のスイッチは積の集合演算の実行に対応している。それぞれの演算を特定するためのコマンドと回転角度が XBee 通信で物体検知ミドルウェアに渡される。

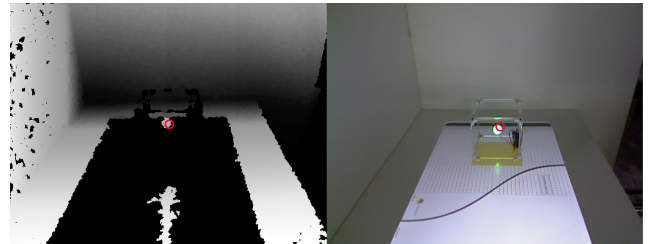


図 7 Kinect の RGB カメラ映像から緑色を検出した位置に赤い円が描画されている (右)。同位置には、深度カメラでアクリル球が確認できる (左)

Figure 7 Red circle is showed where the green color is detected (right). Acrylic ball is at the same position (left).

5.2 物体検知ミドルウェア

物体検知ミドルウェアは、Processing で開発している。Kinect センサーの RGB カメラと深度カメラを組み合わせてプラトン立体型インタフェースの位置を検知する。まず RGB カメラで緑色を対象とした色認識アルゴリズムを実行し、高輝度 LED ボールの XY 平面における位置を求める。その位置における深度値を Kinect センサーの深度カメラから取得し、線形補間して Z 座標を求めている。プラトン立体型インタフェースのアクリル製稜線パーツは透明度が高く赤外線透過するが、表面が曇ったアクリル球は赤外線を反射するため、Kinect の深度カメラを用いると、高輝度 LED ボールの位置を捉えやすい。また、色認識をする際に、高輝度 LED ボールがアクリル板に反射し誤認識をする場合がある。この問題に対しては、タッチディスプレイの輝度を上げることで誤認識を軽減することが出来た。図 7 右に Kinect の RGB カメラで緑色を認識している様子を示す。RGB カメラで色認識した位置には、深度カメラでアクリル球が確認できる (図 7 左)。物体検知ミドルウェアでは、XBee 通信で受信したプラトン立体型インタフェースの回転角度と XYZ 座標を形状パターン生成ソフトウェアに WebSocket で送信する。

5.3 形状パターン生成ソフトウェア

形状パターン生成ソフトウェアは、Google Chrome ブラウザで動作する WebGL アプリケーションとして開発した。集合演算の実装は、オープンソースの集合演算ライブラリ

OpenJsCAD[15]を使用している。形状パターン生成ソフトウェアは、上面図、集合演算の履歴ツリー、原型ビューワー、形状パターンビューワー、形状パターン生成ボタンから構成されている(図8)。物体検知ミドルウェアからWebSocket経由で受信したプラトン立体型インタフェースのXYZ座標と回転角度を元に、形状パターン生成ソフトウェアの左半分はその上面図を表示している。

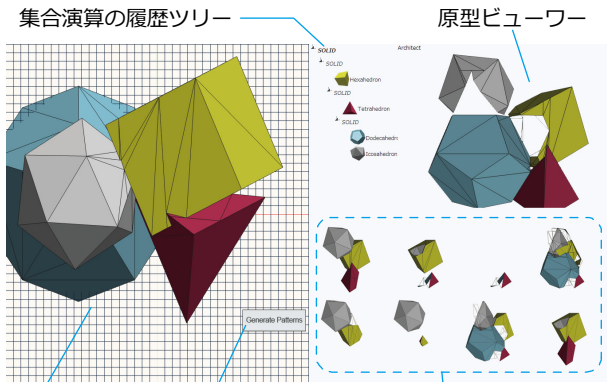


図8 形状パターン生成ソフトウェア

Figure 8 Shape-pattern generation software.

この上面図は、実際のプラトン立体型インタフェースとほぼ同じ大きさで表示されている。また、形状パターン生成ボタンをユーザが選択すると、原型ビューワーに原型の三次元モデルが表示され、形状パターンビューワーにはランダムに集合演算を実行した結果が表示される。加えて、集合演算の履歴ツリーは、集合演算の実行順番が表示される。

6. まとめと今後の展望

本稿では、プラトン立体型インタフェースを用いた集合演算による形状パターンの生成システム ASOM2 について、筆者らのモチベーションとコンセプトと共に報告した。筆者らは、プラトン立体を最小単位としたモデリングがユーザの創造性や直感性に貢献するかもしれないと考えている。今後の展望として、それを検証するために次のような実験を考えている。プラトン立体と、火や水といった元素との対応を知らない被験者を対象に、本システムを用いて感性的な形状を提案させる。ここで述べる感性的な形状とは、例えば揚力を得るための翼の形状や抜き勾配を考慮した金型といった特定の機能や条件を満たす最適解としての形状ではなく、熱そうに見える形状や硬そうに見える形状、どろどろしているように見える形状といった具合に、事物の性質を被験者の感受性で表現した形状を指す。このような形状は十人十色で、最適解は無いと考えられる。だが、その形状の構築に多く用いられたプラトン立体を調査することで我々がプラトン立体に抱く感性が明らかになり、意図した性質を抱かせる形状のデザイン解を提案することが出

来ると考えられる。このデザイン解は、触れずとも視覚的にユーザに性質を感じさせる形状を持つ人工物や工芸品のデザインへの応用が期待できる。

謝辞 ASOM2 の撮影にご協力頂いた長谷川智祥氏と林由佳里氏に、謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Goldstein, S.C., Campbell, J.D. and Mowry, T.D.: Programmable Matter, IEEE Computer, Vol.38, No.6, pp.99-101 (2005).
- 2) Kurokawa, H., Tomita, K., Kamimura, A., et al.: Distributed Self-Reconfiguration of M-TRAN III Modular Robotic System, Int. J. Rob. Res., Vol.27, pp.373-386 (2008).
- 3) Zykov, V., Mytilinaios, E., Adams, B., et al.: Self-reproducing machines, Nature, Vol.435, No.7038, pp.163-164 (2005).
- 4) Coelho, M., Ishii, H. and Maes, P.: Surfex: A programmable surface for the design of tangible interfaces, Proc. CHI EA'08, pp.3429-3434, ACM (2008).
- 5) Akira Wakita, Akito Nakano, Michihiko Ueno, SMAAD Surface: A Tangible Interface For Smart Material Aided Architectural Design, in Proceedings of CAADRIA 2011 - Circuit Bending, Breaking and Mending (The 16th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia), pp.355-364, Newcastle Australia (2011).
- 6) 中野亜希人, 脇田玲: 磁性ゲル形状ディスプレイの開発とインタラクション手法の検討, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.4, pp.1528-1537 (2013).
- 7) 三次元力触覚入力デバイス Geomagic Phantom, available from <http://www.ddd.co.jp/phantom/> (accessed 2014-07-22).
- 8) Ishii, H., Biderman, A. and Ratti, C.: Continuous Tangible Interfaces: Bringing Clay and Sand into Digital Design. BT Technology Journal, Vol.22, No.4, pp.287-299 (2004).
- 9) Z Brush, available from <http://oakcorp.net/zbrush/index.php> (accessed 2014-07-22).
- 10) Negroponte, N.: Towards a Humanism through Machines Architectural Design, Vol.39, Issue 9, pp.511-512 (1969).
- 11) Akito Nakano and Akira Wakita, ASoM: Augmented Solid Modeler using Boolean Operations with Tangible Objects, in Proceedings of CAADRIA 2014 - Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture (the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia), pp.117-126, Kyoto Japan (2014).
- 12) 中西泰人: 選好関数を用いた対話型進化システムの制御と評価: 遺伝的プログラミングのデザイン支援システムへの応用, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp704-711 (1998).
- 13) ARKHITEKTOME, available from <http://arkhitektome.com/form/> (accessed 2014-07-22).
- 14) Blinn, J.F.A.: Generalization of Algebraic Surface Drawing, ACM Trans. Graphics, Vol.1, No.3, pp.235-256 (1982).
- 15) OpenJSCAD.org available from <http://openjscad.org/> (accessed 2014-07-22).