

特集 ■ 3D プリンタと VR

VR で広がるインタラクティブファブ리케이션



筧 康明

慶應義塾大学

Kakehi Yasuaki

1. デジタルファブ리케이션と VR

この数年、特に3Dプリンティング技術にかかる注目・期待が拡大している。さらに、レーザカッタや3Dスキャナなど他のデジタルファブ리케이션マシンの選択肢や組み合わせも充実し、我々の日常の制作環境が大きな変化を見せている。

デジタルファブ리케이션技術の価値が様々な議論・表現される中で、その一つとして挙げられるのはラピッドプロトタイプング（迅速な試作）の実現だろう。3Dプリンタやレーザカッタ等を介した加工により、コンピュータの中でモデリングした物体が手軽に実体を有するオブジェクトに変換される。ユーザは、実体に触れながら試作を行うというプロセスを踏むことで、バーチャル環境で十分な設計・検討を施したのちに完成品を造形する従来の手法とは異なるメリットを享受できる。

ただし現状では、これらのマシンは造形に（従来に比べて短い工程で済むものの）一定以上の時間を必要とすることもあり、モデリング作業と造形出力作業の間に少なからず乖離がある。比較として、粘土細工やスケッチ・ドローイングといった手作業を前提としたアナログの創作は、必ずしも予め明確に存在するイメージを形に落とし込むのみならず、素材との即時的な対話の中で作りたいイメージを見つけていくという作り方を許容してくれる。デジタルファブ리케이션にこれと同じようなプロセスを期待するには、実体化される物体との直感的・直接的な操作・対話を可能にするツールや環境の構築が望まれる。このようなマシンの物理的制約の緩和・解消に向けて、バーチャルリアリティ（VR）技術の適用は可能性を含んでいる。本稿では以下、二つのアプローチに分けて現行の研究動向をまとめるとともに、筆者らの具体的な取り組みについても紹介する。

2. インタラクティブファブ리케이션

デジタルファブ리케이션とVR技術とを関連付けた先駆的研究として、Willisらが提唱したInteractive Fabrication[1]というコンセプトおよび一連のシステムがある。これは、直感的、身体的な入出力を兼ね揃えた工作機械によるものづくりであり、人と機械の作業を統合した造形を可能にする。

例えば、Shaper [1]という装置は、ユーザがテーブル天板に設置された透明のタッチパネルの上に指を置くと、タッチパネルの直下でCNCマシンが指の動きに合わせて作動し、ポリウレタンフォームを射出する。ユーザは、天板でスケッチをするような感覚でマシンをコントロールし、ポリウレタンフォームを配置することで立体的な造形を行うことができる。同様のアプローチとして、MuellerらのConstructable[2]はレーザポイントによる入力とレーザカッタを組み合わせた木材加工装置である。木板にレーザポイントで図形を描くと、コンピュータが手描きの線を精度の高い線に補完し、レーザカッタで切削してくれる。これらの研究では直感的・身体的なインタフェースを導入させることでそれらの関係を補完することを目指している。

この一方で、上記の装置では、ユーザの作業面と造形（作用）面とに空間的なずれがあり、視覚的なフィードバックも多くはないため、ユーザの直感的な操作としては十分とはいえない部分もある。

これに対して、実空間に情報を重ね合わせるMixed Reality技術を3Dプリンタに取り入れるというアプローチがある。例として、YeeらはHMDを用いて空間上に3Dモデルをバーチャルに描画し、それを実際に3Dプリンタを用いて造形できるというインタフェースを提案している[3]。これはモデリング時の身体的動作とデー

タとの空間的整合性は保たれるが、造形プロセスは別になっている。MixFab [4] は、深度センサを用いて実物体の形状をスキャンし、ハーフミラー越しにそのデータ形状を閲覧しながら設計することができるシステムである。これは、実オブジェクトを見ながらモデリングができるという点の特徴だが、実体化は通常の 3D プリンタに頼っている。

これに対して、筆者らはデジタル環境での作業と実空間の作業をシームレスにつなぐ新たなインタラクティブアプリケーションマシン MiragePrinter を開発している。設計プロセスと造形プロセスを一つの装置内で行うために、実際に立体物を造形しながら設計データを編集したり、実物体に直接新たな造形パーツを付け足すなどの造作を可能にする。

3. MiragePrinter

MiragePrinter (図 1) は、筆者が慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科の山岡潤一と進めている研究である。詳細については大会予稿 [5] を参照されたい。

まず、この装置では、市販の 3D プリンタをベースに

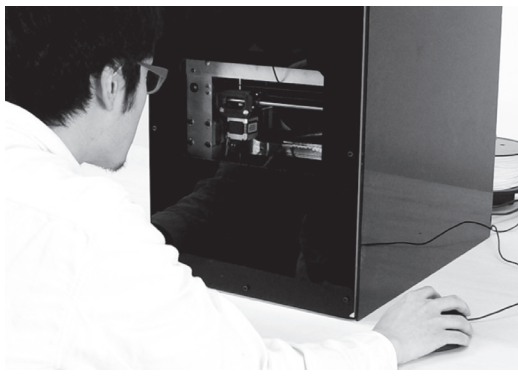


図 1 MiragePrinter

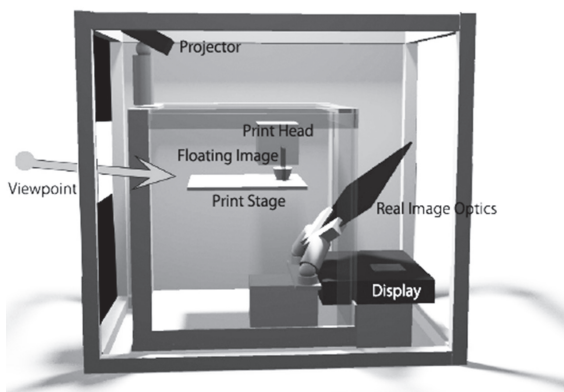


図 2 MiragePrinter の仕組み

する。用いるプリンタは、G-code によってプリンタヘッドの位置や材料射出の有無などのふるまいをコンピュータから直接制御することができる。

次に、現在のシステムでは、ユーザは 3D プリンタの正面から内部を覗き見ることを想定する。ユーザの視点からは、図 1 のようにプリンティングされるステージの上に空間的に表示される 2 次元の映像を観察することができる。これらの空中像を、物理的に出力されるオブジェクトの位置や、出力の段階に合わせて表示することで、ユーザの設計支援や、出力中のエンタテインメントなどへの応用を目指すものである。

本システムで実現される機能として、ユーザはモデリングデータの設計をステージの上で実物大で行うことができる。例えば、ある既存の皿に合わせてコップをデザインしたい場合などには、ステージの上に皿を乗せて、その横で皿を設計できる。また、既存の実オブジェクトの輪郭をなぞることで、簡易的に形状のスキャンを行うこともできる。さらに、このシステムの特徴として、造形の途中でもその先のデータを編集・更新することができる。空中に結像して見えるデータが次第に実体を伴って造形されていき、実体化されていない部分は常に編集可能である。対話の中で、データが最終的に手にとれるオブジェクトになる。

本システムでは、3D プリンタはノズルが上部にあり、ステージの上を三次元的に動きながら、フィラメントを出して造形を行う。3D プリンタのステージの上に、空中像を提示するために本研究では AI Plate を利用する。図 2 のように AI Plate を 3D プリンタの後部に 45 度の角度をつけて設置し、その下に小型のモニタを上向きに配置する。これにより、3D プリンタの正面から内部を見ると、ステージの上に鉛直にモニタの画面が浮かんでいるように見える (図 3)。

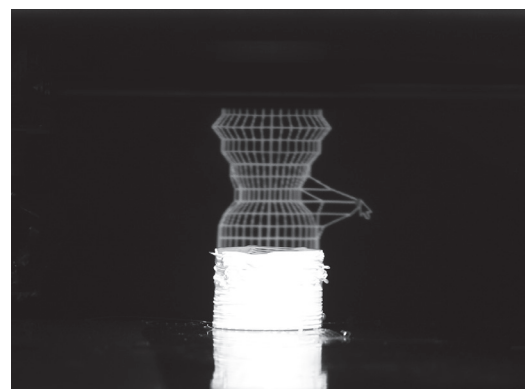


図 3 デリングの様子 (口絵にカラー版掲載)

4. ハイブリッドクラフト

4.1 手仕事に介入し拡張するクラフトツールの提案

インタラクションとデジタルファブ리케이션に関する議論として、これまでに紹介した研究は既存のデジタルファブ리케이션マシンを前提としたアプローチである。これに対し、筆者らが現在取り組むもう一つのアプローチに、人間の手作業のデジタル技術による補助・拡張がある。これは、粘土細工や紙へのドローイングなど、人間の手作業の延長線上にデジタル技術の機能やその恩恵を融合させていく取り組みである。

この分野で既に先駆的に進んでいる研究として、Zoran らがデジタルファブ리케이션とクラフトの融合を提案している [6]。これは、2015 年の ACM SIGGRAPH で Hybrid Craft Gallery が企画されるなど、注目の分野として立ち上がってきている。中でもインタフェースとしての具体的研究事例として、彼らの一連の研究の中で FreeD というシステムを挙げる。これは、簡潔に表現すれば 3 次元位置センサを取り付けたデジタルミリングマシンである。空間中の位置・姿勢に応じて手持ち型のミリングマシンの on/off をデジタル制御することにより、あらかじめコンピュータに入力したモデリングデータに近い形状の造形物を「手で」作り出すことができる。これに近いアプローチを紙の上のドローイングに適用した例として、Kim らの DigitalRubbing [7] が挙げられる。このシステムでは紙を専用のペンでこすることで、コンピュータ内のグラフィックを、紙の上に「手で」写し取ることができる。具体的な仕組みとしては、タブレットとソレノイドの内蔵されたペンを用いることで、適切な位置にペン先が接触すると、ペン型デバイスのペン先が押し出され、それ以外の位置では中に格納されるという制御を施すことで、紙に絵を描き出す。

これらは、人の手でもコンピュータで設計したデータを作ることができるという以外に、コンピュータで設計したデータに人の手が加わることによる味や偶発性を加えることができるという意味づけが可能である。

さらに、空間的な位置情報に応じてツールのふるまいを制御するというアプローチに加えて、他にもそのハイブリッドな関係は表現可能である。以下に、筆者らの取り組みを 4 つ紹介する。

4.2 enchanted scissors [8]

絶対的な位置に対してそのふるまいを制御するのではなく、紙に描かれた線との位置関係でふるまいを変えるハサミが我々の開発した図 4 の enchanted scissors である (山下真裕, 山岡潤一と共同で開発)。

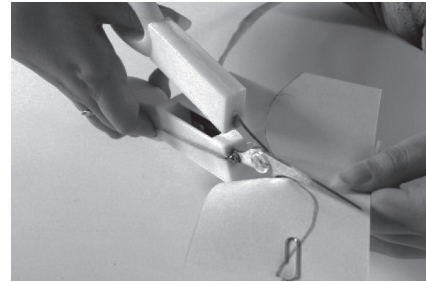


図 4 enchanted scissors

鉛筆で描いた線は導電性を有する。また、一般的なハサミの刃も導電性を有する素材で作られていることが多い。このことに着目し、本ツールでは線の上に刃が当たった際に、線から刃を伝う電気を通して接触を検出する。このイベント検出と刃に取り付けたストッパーを連動させて、「線の上のみ切ることができる」、あるいは「線の上は切ることができない」といったハサミのふるまいのインタラクティブなルールを設定した。

本ツールを用いると、例えば目を閉じていても線の上から外れずに線を切ることができるというような体験が提供できるが、実際の作業の中で「はみ出すことを恐れずに」自由に切ることができるというような積極的創作を促すツールとして位置付けている。

4.3 dePENd [9]

山岡潤一と共同で開発した dePENd (図 5) も、紙の上での手作業での創作に、ゆるやかなガイド・制約を与える装置である。この装置では仕掛けはテーブルにあり、ユーザは一般的なボールペン、一般的な紙を用いて、いつもの描き味を保ちながら創作できるという特徴がある。

これは、ボールペンの先端が強磁性を有することを利用し、テーブル天板背面に取り付けられた磁石を動かすことによって、ボールペンの動きをコントロールする。コンピュータ制御による XY プロッタが磁石をインタラ

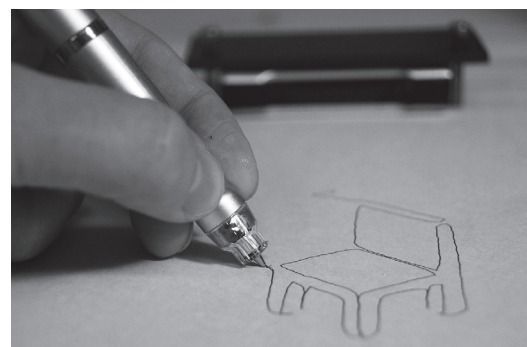


図 5 dePENd

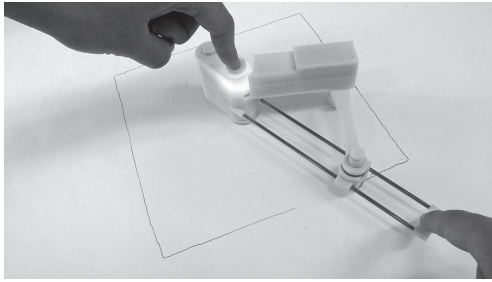


図 6 COMP*PASS



図 7 metamoCrochet (口絵にカラー版掲載)

クティブに動かすことにより、フリーハンドでの直線や円の描画や、描いた線を記録・複製という機能を付与することもできる。

ペンは磁力の影響を受けるのみであることから、ユーザがマシンの誘導に反して自分の動きを加えることも可能で、クリエイションの中でゆるやかな制約として利用できる。

4.4 COMP*PASS [10]

中垣拳と共同で開発した COMP*PASS (図 6) は、人間の単純な操作をツールが拡張して、デジタルマシンならではの機能を付与するものである。

ビームコンパスの形状をしたデバイスにおいて、回転角度に応じて回転軸からペンまでの距離を可変にすることにより、回すだけで円以外の形状を描画することができる。

また、図形を描くのみならず、長さを測りとりというコンパス本来の使い方を継承し、COMP*PASS で図形をトレースすると、その形状を記録・複製できるという機能も実装した。対象は二次元の図形に止まらず、三次元のボックスの形状を測りとり、COMP*PASS を回すことにより展開図を紙の上に描くというような応用も提案している。

4.5 metamoCrochet [11]

岡崎桃子、中垣拳と共同で開発した metamoCrochet (図 7) は、毛糸の編み物に介入するツールである。温度によって変色するインクで毛糸を染め、編棒の先端に温度を可変にするモジュールを取り付けることよって、毛糸を途中で切り替えることなく、部分的に変色させながら編み上げることができる。加熱の時間を調整することでグラデーションのような変色効果も表現可能である。

現状マニュアルでのスイッチングを前提とした提案だが、作業の進行具合をセンシングして自動的に変色を制御することができれば、ユーザは柄を気にせずに形を編むだけで、完成物にテクスチャが現れるなどの体験が可能だと考えている。

5. むすびに

本稿では、デジタルファブリケーション技術と人間の関係をつなぐインタフェース、およびインタラクションの部分に焦点を当てて、マシンをより直感的に操作するためのインタラクティブファブリケーションの取り組みと、手作業をデジタル技術により拡張していくハイブリッドクラフトの考え方に基づく取り組みを概観した。

これらは、初心者のものでづくりへの導入として、あるいは教育ツールとして、さらには専門的なものでづくりを支援する人間中心的な創造ツールとして幅広い応用可能性が考えられる。ものでづくりを個人の手に取り戻すというパーソナル・ファブリケーションの思想を体现するために、作る道具自体も個人のニーズや状況に合わせてデザインされ、使いやすいように作り変えられるという自由度を与えることが重要な取り組みとなる。

今後の課題・展望として、現状はハードウェアとしてのツールの開発に注目が集まっているが、他者の創作物や創作プロセスデータの活用などソフトウェア的なアプローチと効果的に組み合わせていく必要がある。そして、人間と機械の協働の結果として生まれる新たなプロダクトの提案も期待される。また、ツール同士や創作環境、コミュニティとの連携など、系をつなげていくことも重要なテーマとなるだろう。

謝辞

本原稿を執筆するにあたり、共に研究を進めてきた山岡潤一氏、中垣拳氏、山下真裕氏、岡崎桃子氏をはじめとする慶應義塾大学 SFC 寛康明研究室の皆に感謝します。

参考文献

- [1] Willis, K. D., Xu, C., Wu, K.-J., Levin, G., and Gross, M. D. Interactive fabrication: new interfaces for digital fabrication. In Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, TEI '11, ACM, 69–72, 2011.

- [2] Stefanie Mueller, Pedro Lopes, Konstantin Kaefer, Bastian Kruck, and Patrick Baudisch. 2013. constructable: interactive construction of functional mechanical devices. In CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '13). ACM, 2013.
- [3] B. Yee, Y. Ning, and H. Lipson. Augmented reality in-situ 3D sketching of physical objects. In Intelligent UI Workshop on Sketch Recognition, 2009.
- [4] Christian Weichel, Manfred Lau, David Kim, Nicolas Villar, and Hans W. Gellersen. MixFab: a mixed-reality environment for personal fabrication. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14). ACM, 2014.
- [5] 山岡 潤一, 筧 康明. 空中像ディスプレイと 3D プリンタを用いたインタラクティブファブ리케이션ツールの基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会大会, 32E-2, 2014.
- [6] Zoran, A., and Paradiso, J. A. Free-D: a freehand digital sculpting tool. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, ACM, 2613–2616, 2013.
- [7] Kim, H., Kim, S., Lee, B., Pak, J., Sohn, M., Lee, G., and Lee, W. Digital rubbing: playful and intuitive interaction technique for transferring a graphic image onto paper with pen-based computing. In CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '08, ACM, 2337–2342, 2008.
- [8] Yamashita, M. M., and Kakehi, Y. enchanted scissors: A Scissor Interface for Support in Cutting and Interactive Fabrication. In Proceedings of SIGGRAPH 2013 Posters, ACM, 33, 2013.
- [9] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi. dePENd: augmented handwriting system using ferromagnetism of a ballpoint pen. In Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13). ACM, pp. 203-210, 2013.
- [10] Ken Nakagaki and Yasuaki Kakehi. Comp*Pass: a compass-based drawing interface. In CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '14). ACM, pp. 447-450., 2014.
- [11] Momoko Okazaki, Ken Nakagaki, and Yasuaki Kakehi. metamoCrochet: augmenting crocheting with bi-stable color changing inks. In ACM SIGGRAPH 2014 Posters (SIGGRAPH '14). ACM, Article 19, 2014.

【略歴】

筧 康明 (KAKEHI Yasuaki)

慶應義塾大学環境情報学部准教授

2007 年, 東京大学大学院学際情報学府博士課程修了。科学技術振興機構さきがけ研究員を経て, 2008 年, 慶應義塾大学環境情報学部専任講師, 2011 年より同准教授, 現在に至る。実世界情報環境デザイン, メディアアートなどに関する研究に従事。博士 (学際情報学)。