

特集 ■インタラクション技術の新展開

計算機による紙工作支援

三谷 純
MITANI JUN

筑波大学

1. はじめに

計算機の登場以来、製品の形状設計を計算機で行うことが広く普及し、現在では複雑な形状を含む製品の設計を計算機無しに行うことは考えられないようになってきている。近年では形の設計にとどまらず、機能評価、強度計算、熱解析、製造支援など種々の機能が備わったアプリケーションが登場している。これらのアプリケーションは機能が高度になる一方で、その操作も複雑となり、一般ユーザが手軽に扱うことは難しくなっている。

他方、3DCG の分野ではユーザインタフェースを改善するための研究が絶えず行われている。その中でも特に手書きスケッチのインタフェースによる形状モデリングを可能とした SKETCH [1] や Teddy [2] の研究の貢献は極めて大きい。また、コンシューマ向けの安価で簡易な 3DCG ソフトが様々な登場している。例えば、マンガを描く感覚で 3D モデルを構築できる六角大王 Super [3] や、建築物を簡単な操作でモデリングできる Google SketchUp [4]、Teddy のインタフェースを組み込んだマジカルスケッチ [5] など、この分野の進歩は目覚ましいものがある。一般ユーザ向けの CG アプリケーションの普及には、そのインタフェースの優劣が大きな影響を与えると断言しても過言ではない。

ところで、CG ソフトでデザインされる形には、なんら物理的な制約がなく、任意の場所に任意の形を配置できる。いってみれば究極に自由なデザイン環境であると言えよう。デザインした形を仮想空間で扱うことだけを考えるのであれば、自由度が高いことはよいことであろうが、ひとたび、そのデザインされた形を実際に「もの」として作成しようとした場合には、物

理的な実現可能性の観点から、大幅な修正が余儀なくされることが多い。

さて、私は長いこと「紙」で形を作ることに興味を持ち、その対象とする形を計算機で設計することを行ってきた。具体的には、ペーパークラフト（紙模型）や、ポップアップカード、折紙などを対象としたアプリケーションの開発である。対象とする素材が日常生活に身近な「紙」であるがために、ユーザ層にはパソコン初級者を想定した。そのためにもインタフェースは極力シンプルで直感的で、使いやすいものである必要がある。出発は紙で形を作ることを支援するためのアプリケーションの開発であったが、結果と得られた成果物に着目したときに、ものづくりのためのインタフェースという観点から、それに必要となる興味深い考察が得られた。

一言で「インタフェース」と述べたが、ここでは次に述べるように二つのインタフェースに分けて考える。

まず一つめは「背後にある（物理的）制約をユーザに意識させずに形状を簡単にデザイン可能とするためのインタフェース」であり、もう一つは「目的とする実物の作り方（組み立て方）の理解を支援するインタフェース」である。つまり、目的の形を「紙」という素材で作るときに、その素材に起因する物理的な形状の制約を意識せずに、形の設計に専念させること。そして、ユーザがデザインしたものを実際に作る際に、作りやすい方法を提供すること。という二つを念頭に置く必要がある。

これらについて、過去に著者が開発を行ってきたアプリケーションの実例を交えて紹介したいと思う。なお、ここでは紙で形を作ることを目的としたアプリケー

ションの紹介を行うが、これらの背景にある、前述のインタフェースに関する二つの観点は、他の「ものづくり」用のアプリケーションにも共通する話であると考えている。

2. ペーパークラフト用アプリケーション

一般に自由曲面を持つ形を紙で作成することはできない。伸び縮みしない紙で作れる形状は、「可展面」と呼ばれる平面多角形や円錐面、円柱面の集合で形が表現されている必要がある。しかし、このような制約を満たすように注意しながら意図した形状を設計することは大変困難である。もちろん細かい三角形の集合で表現された三角形メッシュモデルは、平面多角形の集合であるから展開可能であるが、それを実際に組み立てることを考えると現実的で無い場合が多い。一方で少ない数のポリゴンで形を表現した場合には、滑らかな曲面を持つ紙模型にはならない。

そこで私が行った研究 [6] では、測定データから得られるような密なメッシュモデルを対象とし、それを帯状の形状の集合で近似することで、滑らかな曲面を持った展開図を生成する方法を考案した (図 1)。

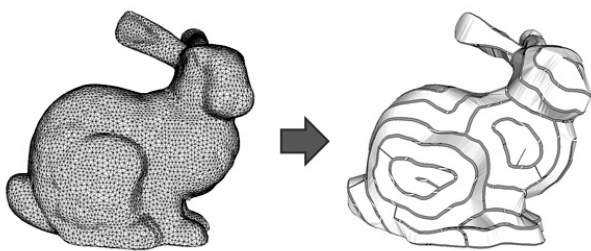


図 1 密なメッシュモデルを帯状の形状の集合で近似する

この方法は、リンゴの皮むきをイメージしていただくとうわかりやすいと思うが、厳密には展開可能な曲面ではない細長い三角形の集合を紙の柔軟性を活かして表現することで実現したものである。

また、これとは逆のアプローチとして、荒いポリゴンモデルから、細分割によって紙工作可能な曲面モデルを生成する手法の実装も行った [7] (図 2)。一般に形のデザインは荒いポリゴンから行うことが多いため、概略形状が決まってから、紙で作れる曲面の集合に置き換えることができる利点がある。一般的な 4-to-1 分割とは異なり、紙で作ることが可能となる帯状の形状が生成されるような分割を行うようにした点に特徴がある。

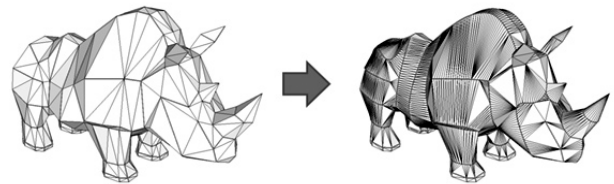


図 2 荒いポリゴンモデルから紙工作できる曲面を生成する

これらの機能によって、ユーザは「紙で作るために満たすべき形状の制約」から解放され、目的の形を比較的自由にデザインすることができる。

次に、実際に組み立てることを考えたときに、作りやすい方法の考案について述べる。まず、どのような展開図が作りやすいのかを定量的に測定するために、直線のカット、折り曲げ、貼り合わせなどにかかる時間を複数の被験者に対して計測し、それをもとに展開図から組み立てにかかるコスト (時間) を算出する方法を考案した。これにより、組み立てに時間のかからない展開図を戦略的に生成する際の指針とすることができる。

得られた展開図に対して、そのままでは組み立て方がパズルのように難解である場合があるため、ユーザの組み立て方に対する理解を促す機能の実装も行った。例えば、互いに貼り合わせるべき辺に共通の識別番号を表示したり、展開図上の面と 3D モデル上の面で対応関係がわかるような表示を行うなどの工夫を行った。また、パーツを分割して表示したり、切開された場所が強調して表示されるなどの工夫も行っている。このように組み立て方をディスプレイ上で確認する仕組みを組み込むことで、ユーザが「組み立て説明書」が無くても組み立てられるように配慮を行っている。

3. ポップアップカード用のアプリケーション

1 枚の紙に対して、切込みを入れるだけで、90 度を開いたときに形が立ち上がるもの (このようなものを「折紙建築」と呼ぶ) を対象とするアプリケーションの開発を行った [8]。ポップアップカードの場合、目的とする形状が定まっても、その展開図を設計するのが難しいという問題があり、一般ユーザが自分で展開図を設計することは困難である。

そこで、ユーザは実際に飛び出す形のデザインだけに専念でき、計算機が自動的に展開図を生成する仕組みを実装することとした。ただし、1 枚の紙に切り込みを入れるだけで作られる形であるため、任意の形を

設計できるわけではない。そこで、ユーザの操作によって、作られる形は、必ずその制約が満たされるようにした。このアプリケーションでデザインできる形は、必ず制約を満たすため、ユーザは制約を満たすような工夫をせずに、このアプリケーション内であれば自由に形を設計することができる。そのためのインタフェースは極力シンプルにし、簡単なマウスカーソルとキーボード操作で、ブロックを積み上げる感覚で形をデザインできるようにした。完成形のイメージを3D表示で確認しながらデザインを進め、任意の段階で展開図を自動生成することができる(図3)。得られた展開図はカッティングプロッタを用いて自動でカットすることもできる。

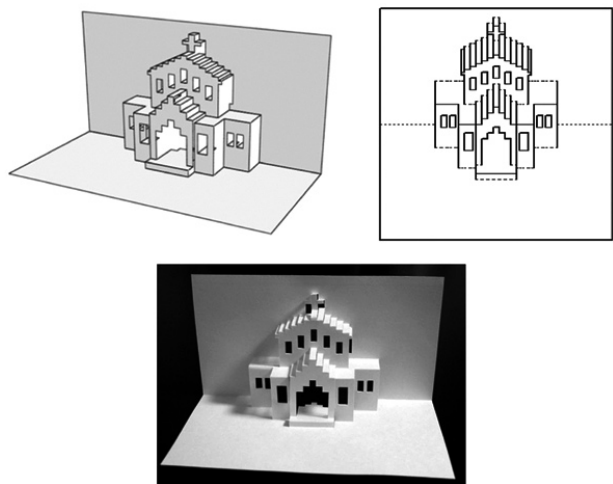


図3 PC上でデザインされた形状(左上)、展開図(右上)、作成したポップアップカード(下)

このアプリケーションを中学校での授業に導入していただき、評価を行うことができた[9](図4)。生徒は、形の設計に専念することで、目的の形が立ち上がるポップアップカードをデザインすることができた。

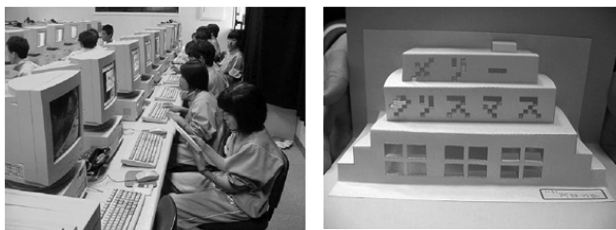


図4 中学生による演習風景と作成された作品

4. 折紙用のアプリケーション

紙で形を作るうえで、「折紙」はまず最初に思い浮かぶ最も身近で多くの方に親しまれているものであろう。正方形の紙を切らず、貼らずに、ただ折るだけで形を作る折紙は、身近なものである一方で、制約が厳しく意図した形を自由に設計することはとても難しい。それでも、近年の折紙の数理に関する研究成果から、様々な複雑な折紙を計算機を用いて設計する技術が確立されつつある[10]。

さて、私はまだ折紙のための形を自由に設計できるアプリケーションを開発できていないが、ここでは、折紙を計算機で扱うことに関する研究を紹介させていただこう。まず、私の研究室で行っている研究の一つに、対話的な操作で仮想空間上の折紙を折るというものがある[11]。両手で行う折り操作とマウスで行う操作は完全に異なる。これらを違和感の無いインタフェースで実現しようとする試みを行っている。具体的には、「折る」という操作を、「折り線を指定する」「折り線を軸とする回転操作をする」という二つのステップに分解し、それぞれをマウス操作で行えるようにした(図5)。厳密な形を得ることよりもインタフェースが容易になることを優先し、内部のデータ構造にはバネマモデルを用いている。

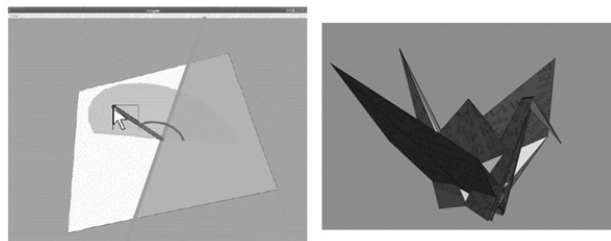


図5 UI画面と作成されたモデル
*口絵にカラー版掲載

また、これとは別に折紙の展開図から折りたたみ後の形状を推定する研究も行っている。展開図は平面上の線分集合であるため、作図は容易である。これを元に紙の重なり順も含めた完成形を予測することで、簡単な入力操作で折りたたみ後の形状を構築できる。これは、紙を折るという直感的な操作ではないが、正確な折紙形状を入力するのに適したインタフェースである。

また、QRコードを印刷した折紙を用いて、折る過程を撮影、解析することで、折紙の形を復元する研究も行った[12](図6)。折る工程ごとに折り方を推測するため、形状の復元後はアニメーションで折り方を再現することができる。

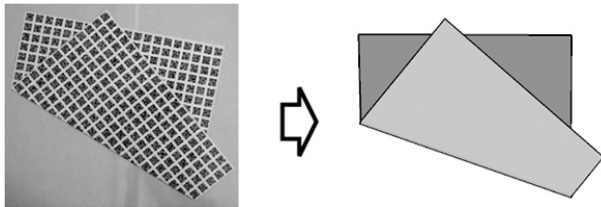


図 6 QR コードを印刷した紙を折った写真から折紙の復元

5. おわりに

これまでに紹介したのは「紙」で形をつくるためのアプリケーションとそのインタフェースであるが、紙以外の素材に対しても同様に考えることができる。計算機を用いて実世界のものをデザインするときに、満たすべき制約を意識せずに形のデザインのみ注力できるシステムを開発することは非常に意味のあることだと思う。

最近では、ぬいぐるみ、あみぐるみ(編んで作るぬいぐるみ)、布の染色、仮想彫刻などの研究もある。計算機の中では簡単に「やりなおし」ができるという素晴らしい特性があるので、様々に試行錯誤が可能である。計算機を用いたものづくりの支援に関する研究は、今後ますます活発になっていくであろう。

その際に、アプリケーションを設計開発する立場としては、物理的な制約をユーザから見えないところに隠す、または分かりやすく提示することが望まれる。またそれだけでなく、デザインした形が実際に組み立てられるのか、どのようにしたら組み立てやすいかなどの提示なども重要であると考えられる。

日常生活の中にある身近なものを対象としたデザインのためのインタフェースには、実世界の中で存在するための制約をあらかじめ組み込んでおくことが重要である。これにより、幅広いユーザが形状デザインに専念できるようになる。このような研究は、まだ始まったばかりであり、今後のさらなる発展が期待できる。

参考文献

- [1] Robert C. Zeleznik, Kenneth P. Herndon, John F. Hughes: SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes, SIGGRAPH96 Conference Proceedings, pp. 163-170 (1996)
- [2] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, Hidehiko Tanaka: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, ACM SIGGRAPH 99, pp.409-416 (1996)
- [3] 六角大王 Super : [http:// www.shusaku.co.jp/](http://www.shusaku.co.jp/)
- [4] Google SketchUp : <http://sketchup.google.com/>

- [5] マジカルスケッチ : <http://shade.e-frontier.co.jp/magical/>
- [6] Jun Mitani and Hiromasa Suzuki : Making Papercraft Toys from Meshes using Strip-based Approximate Unfolding, ACM Trans. on Graphics, Vol. 23, No. 3, pp.259-263 (2004)
- [7] Jun Mitani : Strip creation for designing curved papercraft models adopting mesh subdivision scheme, NICOGRAPH International 2006, CD-ROM.
- [8] 三谷 純, 鈴木宏正, 宇野 弘 : 計算機によるボクセルを用いた「折紙建築」モデルの設計手法, 情報処理学会論文誌 Vol.44, No. 5, pp.1372-1379 (2003)
- [9] 三谷 純, 鈴木 宏 : CG を用いたポップアップカード作成教材の図学教育への応用, 日本図学会, 図学研究, Vol.38, No. 3, pp.3-8 (2004)
- [10] Robert J. Lang : Origami Design Secrets, A K Peters Ltd (2003)
- [11] 古田陽介, 木本晴夫, 三谷 純, 福井幸男 : マウスによる仮想折紙の対話的操作のための計算モデルとインタフェース, 情報処理学会論文, Vol.48, No.12, pp.3658-3669 (2007)
- [12] 三谷 純 : 2次元バーコードを用いた紙の折りたたみ構造の認識とそのモデル化, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.8, pp.2859-2867 (2007)

【略歴】

三谷 純 (MITANI Jun)

筑波大学 大学院システム情報工学研究科
コンピュータサイエンス専攻 講師

博士(工学)(兼任所属機関 科学技術振興機構 さきがけ)
2004年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻
博士課程修了。同年 独立行政法人理化学研究所 基礎
科学特別研究員。2005年より現職。コンピュータグラフィックス, 形状モデリングの研究に従事。