

04 形状モデリングのための 新しいインタラクション

三谷 純（筑波大学）

形状モデリングの役割

椅子や本棚、カバン、ぬいぐるみなど、身近なものを自分の手で、自分の好みに合ったデザインで作りたいと考える人は少なくない。インターネット上から得られる情報と、FabLabに代表されるオープンな工房と加工機の普及により、このような要求を実現するための環境が整いつつある。

どのようなものであれ、実際に制作を行う前には、完成したときの予想図が必要になる。この完成予想図は紙に書いたラフスケッチでも構わないが、それを3次元の幾何データとしてコンピュータ内に構築できれば、そのデータを基に、さまざまな制作の支援を行うことができる。最も直接的な方法としては、入力した形を3Dプリンタで出力することで、目的の形をしたオブジェを手にすることができる。入力した形をソフトウェアによって平面に展開すれば、ぬいぐるみや服を作るための型紙として活用できる。椅子や本棚の形を部材の形まで落とし込み、レーザーカッターなどCNC（コンピュータ数値制御）工作機械で加工するためのデータを自動生成することも可能である。

このように、身近なモノづくりを実現する上では対象物の幾何形状をコンピュータ内に構築する「形状モデリング」が、その第一ステップとして重要な役割を持つと言えよう。自分が欲しいものの形をモデリングできれば、それに続くモノづくり作業を、ソフトウェアの力で支援する方法がさまざまに考えられる。

私たちは通常、自分が欲しいと思うものであっても、そのイメージは漠然としていることが多いた

め、納得のいく形を得る前に、あれこれ試行錯誤することになる。ソフトウェアを用いて形状をデジタルデータとして対話的に構築するのであれば、操作履歴を記録することで、この試行錯誤のプロセスを大幅に効率化できる。また、最終的な形が十分な機能を持ち、必要な制約を満たすように、形状モデリングの段階からユーザーの操作をサポートすることも可能である。しかしながら、対象とされるユーザー層は一般消費者層と重なるため、工学的な専門知識を持たず、また細かく階層化されたソフトウェアを使いこなすことは難しいことが想定される。そのため、直観的で誰でも簡単に操作できるソフトウェアが望まれる。デジタルファブリケーションという身近なモノづくりの新しい時代の到来を垣間見たとき、形状モデリングのためのインタフェースについて考えることは必須である。

筆者は、2007年に発足した「五十嵐デザインインタフェースプロジェクト」にて、このような身近なモノづくりをソフトウェア側から支援するための研究に携わってきた。その中では、目的の形を入力するためのユーザインタフェースに関するプロジェクトが複数立ち上がり、新しいモノづくりの姿が提案された。以降では、スケッチインタフェースおよびAR（Augmented Reality）技術を用いたプロジェクトを複数紹介し、今後の形状モデリングについての展望を述べる。なおユーザインタフェースの紹介に際しては、テキストでの説明だけではなく、動画を参照することで理解が深まるものと思われる。本プロジェクトのWebページ^{☆1}では、多くの動画を

☆1 <http://www.designinterface.jp/>

公開しているので、ぜひそちらも参照いただきたい。

スケッチインタフェースによるモノづくり

頭の中にある、形のイメージを素早く可視化する方法として、昔も今も変わらず手描きスケッチが重宝されている。そのため、手描きスケッチと同じような方法でコンピュータに形状を入力する方法が古くから模索されてきた。紙に鉛筆で絵を描くような操作で形を操作する「スケッチインタフェース」のさきがけは、1960年代に Ivan Edward Sutherland が開発した Sketchpad までさかのぼることができる。Sketchpad ではライトペンを使って幾何学図形をスクリーン上に描くことを実現した。さらに、1つの投影平面上でのスケッチ入力で立体形状を構築できるようにした、Zelevnik らの研究 SKETCH¹⁾ は、大きなエポックメイキングであった。たとえば、直方体を入力するには縦・横・奥行きを指定するための3つの直線を描けばよい。このような、ストローク情報をあらかじめ定められた作図コマンドとそのコマンドに必要なパラメータ値に置きかえる入力方法をジェスチャ入力と呼び、スケッチインタフェースの1つのアプローチとして現在も広く活用されている。

1999年には、自由曲面を持つ立体を簡単に構築可能とする Teddy²⁾ が Igarashi らによって発表された。ユーザは輪郭を作図するだけでよく、あとはシステムがその輪郭に適合する立体を自動生成する。三面図を用いた形状入力が常識だったそれまでの形状設計手法の概念を覆すものであった。当然、輪廓だけでは3次元の形状は一意に定まらないが、我々は経験上輪廓線を見て「領域の広いところは奥行き方向の膨らみも大きいに違いない」と無意識に判断する。Teddy では、この原理に基づいて立体が自動的に構築される。ユーザが入力したマウスの軌跡が、そのまま立体形状の輪廓となる点が画期的であった。

スケッチインタフェースの登場により、さまざまな立体形状を、専門的な知識を持たないユーザが素早く作れるようになった。この技術を活用すること

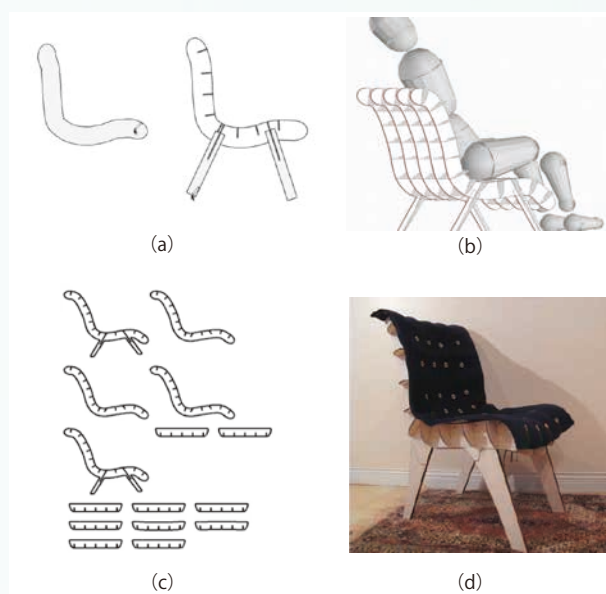


図-1 Sketch Chair システムの概要 (a) スケッチインタフェースによる椅子断面の入力 (b) 自動生成された椅子モデルと人体モデルによるシミュレーション (c) 部材のカットデータ (d) 制作した椅子 ((c)とは異なるカットデータから制作)

で、一般消費者のモノづくりが支援できるものと考えられる。しかしながら、映像制作に用いられる立体形状は、通常そのままではモノづくりに用いることができない。求められる機能を持った形でなければならぬうえ、用いる素材で実際に制作可能な形である必要がある。このような観点から、まずは椅子や棚、ランプシェードなど、機能が単純で形の自由度があり、趣味趣向を意匠に反映しやすいものを対象とすることが現実的である。これらが物理的に満たすべき条件、および、素材の加工法を考慮したうえで、できるだけ自由にかつ直観的にデザイン可能とすることが解決すべき課題となる。ここでは、スケッチインタフェースによる形状モデリングを、実際のモノづくりに結びつけた研究を3つ紹介する。

■ Sketch Chair

Sketch Chair プロジェクト³⁾では、側面形状をストロークの軌跡で入力することで、椅子全体の形状を構築できるシステムが開発された(図-1)。形状デザインの際には、一般的な形状モデリングの技術に加え、構造・バランスについての知識も要求されるため、専門知識を持たないユーザが、椅子とし

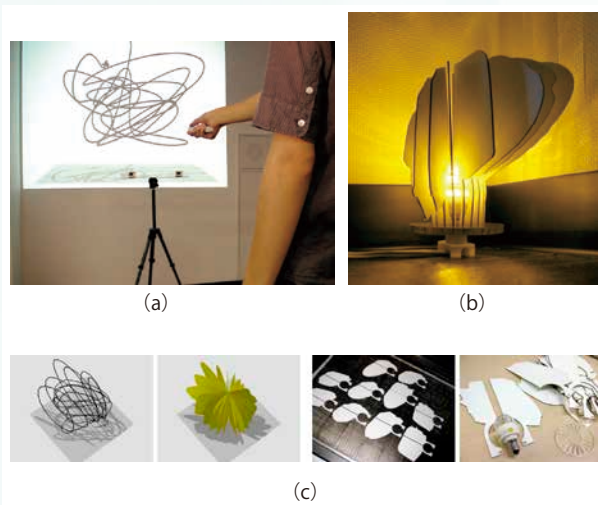


図-2 Spatial Sketch システムの概要 (a) 3次元トラッキングによる空間曲線の入力 (b) 試作したランプシェード (c) 左から順に入力, 平面集合による立体生成, レーザカットした部材, 組み立て

ての機能を果たす形をゼロから構築することは難しい。このシステムは、平板から切り出される部材を格子状に組み合わせて制作することを前提とし、ユーザーが簡単に形状を構築し、その結果を確認するための仕組みを提供する。まずユーザーが画面にデザインしたい椅子の側面をスケッチすると、その形を奥行き方向に複数並べた椅子の形が生成される。生成される形は、平板から切り出される部材を直交するように組み合わせて作られることが保証される。さらに生成された椅子の形状モデルに対して、人体モデルを座らせた様子を物理シミュレーションによって確認したり、たとえばピアノや机などの参照用オブジェを配置することで大きさのバランスを視覚的に確認できる。最終的に、椅子を構成する部材の形が自動的に出力され、そのデータに従って部材を切り出し組み合わせることで、実物の椅子を制作できる。一般の消費者を対象としたワークショップを開催し、それまでに椅子をデザインした経験がない場合でも、容易にオリジナルの椅子をデザインできることを確認した。

■ Spatial Sketch

Spatial Sketch プロジェクト⁴⁾では、3次元空間における入力デバイスの軌跡を用いて立体形状を構

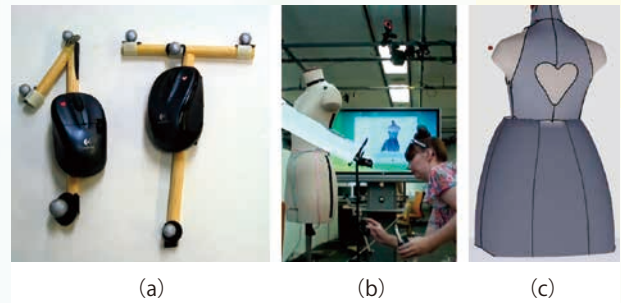


図-3 DressUp システムの概要 (a) デザイン用ツール. 曲面トリム (左) とスイープ (右) (b) 形状モデリングの様子 (c) デザイン例

築するシステムが開発された。スケッチインタフェースの本質は、入力デバイスの軌跡、つまりユーザーの手の動きが、そのまま入力形状に反映される点にある。このプロジェクトでは、ランプシェードのデザインを対象とし、ユーザーが持つポインタの3次元軌跡を入力とした形状モデリングを行った(図-2)。一般に、空間曲線から立体を一意に決定することはできない。提案システムでは、格子状に配置した平面群と3次元の軌跡の交差を抽出し、それに基づいて最終的な立体形状が確定される。このシステムによって、形状モデリングの技術を持たないユーザーでも、3次元空間における腕の動きによって新しい形をさまざまに作り出せることが確認された。

■ DressUp

DressUp プロジェクト⁵⁾では、衣服のデザインのために実物の洋裁用人台と3次元位置計測装置を使ったユーザインタフェースを実現した(図-3)。このシステムでは、マネキンの上で入力デバイスを動かすことで、空間内でのスイープ曲面の生成、トリムといった形状モデリングをスケッチインタフェースで行うことができる。構築された3次元形状はスクリーン上に表示され、ユーザーはその結果を確認しながら編集操作を行う。マネキンを回転させると、スクリーン上の形状も回転する。このように、マネキン自体が入力デバイスの1つとして活用される。もともと、服のデザインはマネキンに対して布や紙をあてて行うため、実装されたシステムのインタフェースは、実際のデザイン方法ときわめて近い。この

ように、マネキンという実物体を参照用途に使うことで、直観的で分かりやすいユーザインタフェースを提供することが可能となった。実際のデザインと異なり、Undo や、パーツのコピーなど、デジタル化されることによる利点を活かすことができ、また型紙を設計された3次元形状から自動生成できる。

AR 技術を用いた形状モデリング

拡張現実と訳される Augmented Reality (AR) は、現実環境に対する人の知覚を拡張する技術の総称であるが、一般には実世界の映像にCGの映像を重畳表示する技術を指すことが多い。本稿でもカメラやヘッドマウントディスプレイなどを通して得られる実世界の映像に、CGの映像を重畳し、視覚的に認識できる情報を拡張する技術を指してAR技術と呼ぶこととする。

たとえば机の上などに貼られたマーカにより、カメラを通して知覚される映像の空間位置を獲得し、それに基づいてCGの映像を重畳することで、あたかも実世界にCGで映し出した物体が実在するように知覚することができる。Computer Visionの技術と、デジタルカメラなどのハードウェアの低廉化、小型化により、このAR技術が現在目覚ましい発展をしている。

一般には、実世界の映像にCGキャラクターを表示させたり、テキストを表示して情報を付加させるなどの使われ方が多い。その一方で近年では編集集中のCGモデルを実世界の映像に重畳することで、形状モデリングに応用しようという試みもされている。これまでに提案されたAR技術を形状モデリングに応用した研究では、ユーザ自身の腕や手のひら、およびモデリングに用いるデバイスの映像に対して編集集中のCGモデルを重畳表示することで、実世界で直接形を操作しているようなユーザインタフェースを提供したものが多い。しかしながら、これらの多くで、デザインした形状はCG映像のために使うことが目的とされており、実世界を参照しながら形状モデリングできることの利点が十分に活用されてい

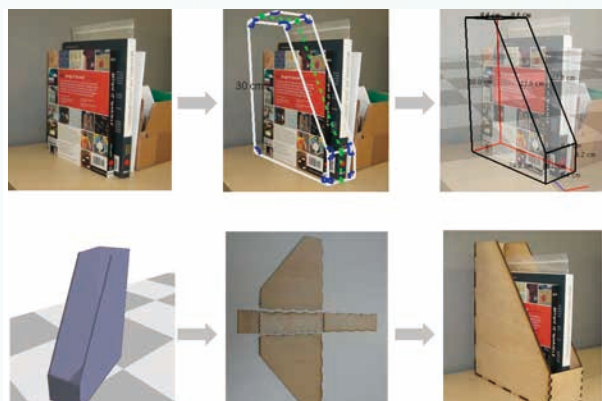


図-4 Modeling-in-Context システムの概要. 左上から順に、入力写真、ユーザによる線画の入力、システムによる補正、3次元形状モデル、切り出した部材、制作物

るとは言えない。

以下で紹介する2つのプロジェクトでは、現実世界の写真または映像に、デザインした形状を重畳表示し、その形状を実際に制作することを行っている。これによって、ARを通して視覚的に確認した状態を、現実世界に再現することが可能となる。特に本棚や机など、デザインする対象物が、実際に使用する空間に適合することが重要であるとき、実世界に完成予想図を配置して視覚的に確認しながらモデリングできることはきわめて有益である。ここでは、このようにAR技術をモノづくりに結びつけた研究を2つ紹介する。

■ Modeling-in-Context

Modeling-in-Context プロジェクト⁶⁾では、写真を入力とし、ユーザはその上に欲しい立体の形状を作図する(このアプローチをARとして紹介するのは適切ではないかもしれないが、モノづくりのための新しいユーザインタフェースを提案したプロジェクトとして紹介する)。

ユーザが写真の上で2次元の図を描くと、目的の形は「左右対称である」「カドは直角である」などの幾何的な制約に基づいて、システムが最適化手法を用いて3次元形状を自動構築する。図-4のように平面の集合で構成される立体形状に対しては、システムが部材の噛み合わせも考慮して加工用の形状を生成するため、そのデータをレーザカッターなどの加工

機に流すことで、実際に板材を組み合わせて制作できる。それ以外の形は3Dプリンタを用いて出力することができる。図-4に示すように、実在する書籍を参照して、欲しい大きさの箱を作ったり、たとえばカップの写真を参照して、そのカップにフィットする皿やふたを3Dプリンタで出力できることを確認した。

■ Situated Modeling

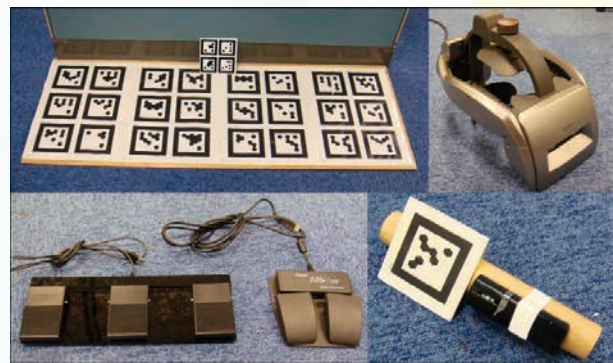
Situated Modeling プロジェクト⁷⁾では、平板や円柱形状など、実在する木材と同じ大きさと形を持つプリミティブを組み合わせて、目的にあった本棚などの家具をデザインできるシステムが開発された。ARによって現実空間に形状モデルを重畳表示することで、部屋へ配置した際の様子をシミュレートでき、得られた形は実在する木材の組合せで制作することが保証される。

3次元形状の入力方法に工夫があり、実物の木材片を入力デバイスとして用いる。たとえば机のデザインをするときには、天板に用いる木材片を動かすことで、天板の位置と大きさを指定できる。脚部をデザインするときには、脚部に用いる木材片を動かす。木材片の位置検出にはあらかじめ大きさなどが登録されたARマーカを用い、プリミティブの加工や移動はARマーカを貼り付けた透明板やUSB接続のフットペダルによって行う。

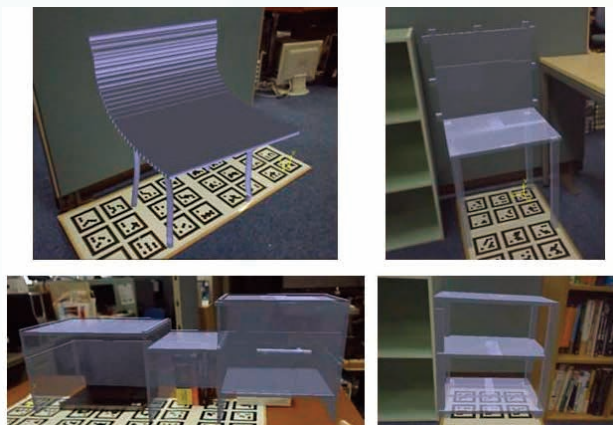
また、部材を両手に持って組み合わせる動作をすることで、部材どうしの接合を行うことができる。一般にARではデザインした形状を触ることができないという、力覚フィードバックの欠如が問題となるが、両手で2つの部材を持ち、それらを互いに触れさせることで、この問題を解決している。図-5に示すように、デザインした家具を配置する予定の環境および各部材にARマーカをつけ、部材に対する操作で、目的の形状を構築することができる。

モノづくりのさらなる発展のために

形状モデリングのためのユーザインタフェースは主にCGの分野で発展してきたが、もはや映像制作の



(a)



(b)

図-5 Situated Modeling システムの概要。(a) 使用するデバイス群。左上から順にワールド座標系のためのマーカ、ヘッドマウントディスプレイ、フットペダル、マーカのついた部材。(b) デザインされた家具モデルの重畳表示

枠にとどまらず、現実世界のモノの形のデザインにも大きく貢献している。直観的で自由に素早く形を作る技術は、一般消費者による自らのモノづくりを実現するために、なくてはならない。特にスケッチインタフェースに代表される、手の動きそのものが形状に反映される操作方法は、ユーザがイメージする形をダイレクトに入力できる強力な方法である。

ユーザの生活空間に適合した家具など、実空間との関係が重要な意味を持つ形のデザインには、CG映像を重畳させるAR技術を活用することが有効である。AR技術は普及し始めてからまだ日が浅いが、このように新しい技術を積極的に取り入れることで、従来の形状モデリングのアプローチにとらわれない、新しいユーザインタフェースが実現する可能性がある。

その一方で、スケッチインタフェースなどCG分

野で発展してきた形状モデリングのアプローチでデザインされる形状は、精度や形の厳密さ、または規格品との整合性などの点で問題が多い。そのため、椅子や棚、服やぬいぐるみなど、従来のDIYや手芸の延長に位置するモノづくりが現実的な対象となっている。電子制御や複雑な機構が必要なモノのデザインには、従来のCADシステムが持つ機能を、いかに簡単に使えるようにするか、考慮すべき課題が多い。

形状モデリングにおける今後の展望としては、必要な精度や拘束条件を満たすようにシステムがスムーズにサポートすること、また、形状モデルができたあとの品質評価、製造支援までを一貫して行えるようにすることが挙げられる。五十嵐デザインインタフェースプロジェクトで取り組んできたことの1つに、本特集の梅谷氏の記事にあるような、形状モデリングシステムへの有限要素法に基づく物理シミュレーションの統合が挙げられる。このように、形状デザインの段階で完成後の動きや機能を確認できるようにすることも重要である。

最後に、形状モデリングのための知識の共有について言及したい。最終的な形状は個々のユーザの意図で決定されるべきであるが、ユーザがデザインするモノの対象が広がると、それぞれが満たすべき機能や構造に対する制約が、ますます複雑になることが想像される。これらを完全にソフトウェアでサポートすることは困難であるから、形状デザインのためのノウハウ、またはモノづくりの勘所をユーザ間で共有し、ときにはデザインの一部を再利用できるようなネットワークが求められることになるだろう。

すでにオープンソースハードウェアと呼ばれる概念が存在し、誰でも使用できる設計図ライブラリが整備されるようになっている。これらから必要な部分だけを抽出して組み合わせたり、複数のユーザ間で形状デザインを分業するなど、より柔軟なネットワークが、デジタルファブリケーションがさらに一歩前進する上でのキーテクノロジーになると予想される。

参考文献

- 1) Zeleznik, R. C., Herndon, K. P. and Hughes, J. F. : SKETCH : An Interface for Sketching 3D Scenes, Proc. of SIGGRAPH 96, pp.163-170 (1996).
- 2) Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H. : Teddy : A Sketching Interface for 3D Freeform Design, Proc. of SIGGRAPH 99, pp.409-416 (1999).
- 3) Saul, G., Lau, M., Mitani, J. and Igarashi, T. : SketchChair : An All-in-one Chair Design System for End-users, The Fifth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (2011).
- 4) Willis, L., Lin, J., Mitani, J. and Igarashi, T. : Spatial Sketch : Bridging Between Movement & Fabrication, The Fourth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (2010).
- 5) Wibowo, A., Sakamoto, D., Mitani, J. and Igarashi, T. : DressUp : A 3D Interface for Clothing Design with a Physical Mannequin, The 6th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (2012).
- 6) Lau, L., Saul, G., Mitani, J. and Igarashi, T. : Modeling-in-Context : User Design of Complementary Objects with a Single Photo, Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling (2010).
- 7) Lau, M., Hirose, M., Ohgawara, A., Mitani, J. and Igarashi, T. : Situated Modeling : A Shape-Stamping Interface with Tangible Primitives, The 6th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (2012).

(2012年10月5日受付)

■ 三谷 純 (正会員) mitani@cs.tsukuba.ac.jp

筑波大学システム情報工学研究科准教授。2004年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士号取得(工学)。2009年より現職。

