

# デジタルペンを用いた3次元モデリング手法の提案

三浦 元喜<sup>1,a)</sup> 山本 将史<sup>2,b)</sup>

**概要:** デジタルペンを用いた3次元モデリング手法を提案する。体験者がペーパークラフトを作成しながら、デジタルペンで簡単な筆記入力を行うことで、作成した紙モデルと同一の3次元オブジェクトを半自動生成することが目的である。そのため、まず体験者は紙から形状を切り取る前に、形状の輪郭線をペンで入力する。その後、紙を組み合わせた接合箇所をペンでなぞることによって、形状同士の接続点を入力する。入力された輪郭線や接続点から物理演算を行うことにより、3次元形状を構成する。マウスやキーボードによるモデリングに比べ、複雑な形状を手軽に作成できることをねらっている。

## Proposal of 3D Modeling using Paper and Digital Pen

MIURA MOTOKI<sup>1,a)</sup> MASASHI YAMAMOTO<sup>2,b)</sup>

**Abstract:** We propose a method to create 3D models by handling papers and a digital pen. First the user draws a cutting line on the paper sheet by digital pen. The shape of the paper sheet is captured, and shown on the PC screen with 3D image. Then the user specifies points to be connected with the paper, the 3D image reflects the connection. Therefore, our method enables the user to generate a simple 3D model from his/her original papercraft. Since the paper-based interaction is common, we expect everyone who builds a papercraft can create their own 3D model.

### 1. はじめに

3次元(3D)でレンダリングされるゲームの普及に伴い、3Dのコンピュータグラフィックス(3DCG)に接する機会が増加している。しかし、一般的に3DCGを製作するためのモデリングソフトやCADシステムは高機能である反面、操作が複雑であるため、マウスやキーボードを駆使した操作が必要である。このため、PC操作に慣れていないユーザにとって、3Dのモデルを自在に作成することは困難である。

我々はより多くの人々が3DCG製作に関わりをもてるようにするために、紙工作を作成する過程においてデジタルペンによる筆記情報を追加することで、3Dモデルを半自動的に生成する手法およびシステムを提案する。

### 2. 提案手法

我々が提案する3Dモデリング手法は、ペーパークラフトを実際に作成する過程において、紙のパーツの輪郭、および、パーツの接続点をデジタルペンによって指定することにより、パーツの空間的な関係を記述し、3Dモデルを生成するものである。すなわち、紙に対して閉曲線を記述すれば、計算機上には同じような形をした閉曲面を出力し、紙の上の任意の二点を指定すれば、計算機上ではその2点をつないだ立体モデルを出力する。このように、デジタルペンをペーパーカッターやステープラに見立てた操作を行うと、計算機上に紙を模した平面あるいは曲面のポリゴンモデルを出力する。平面または曲面の形状は、現実世界の紙の挙動を模した物理演算によって推定する。コンピュータ上に出力する面は、紙のような、曲げに対しての抵抗(ハリ)がある材質を想定している。そのため、平面上の2点をつなぐといった操作のみで、立体的なモデルを生成することができる。図1に、提案手法の概略図を示す。

なお本提案手法において、我々が利用を想定するディジ

<sup>1</sup> 九州工業大学 基礎科学研究系

Faculty of Basic Science, Kyushu Institute of Technology

<sup>2</sup> 九州工業大学 工学府 先端機能システム工学専攻

Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology

a) miuramo@mns.kyutech.ac.jp

b) yamamoto@ist.mns.kyutech.ac.jp

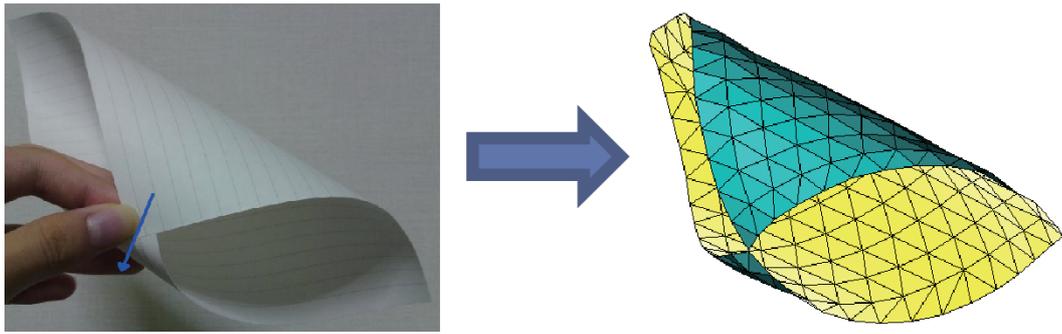


図 1 提案手法の概略：デジタルペンで紙の切り取り形状と接続点を指定すると、対応する 3D モデルを生成

タルペンは、アノト方式のデジタルペンのように、ペンで紙に筆記するだけで、紙の絶対座標が取得できる種類のものである。こうしたペンデバイスは、これまで紙に対する手書き筆記や描画を電子化したり、テキスト化するために使用される例が多かったが、我々はこれを 3D モデリングに適用することを試みた。

具体的な操作の手順工程について、以下の 2.1 および 2.2 で説明する。

## 2.1 工程 1：平面ポリゴンモデルの制作

最初に、作業者はデジタルペンで任意の閉曲線を紙に対して記述する。これによって、記述した形状と同じ形状の平面ポリゴンモデルを計算機上に表現する。本手法では、筆記した曲線データとその内部にノード（頂点）を割り当て、それらを三角形になるようにエッジ（辺）を接続することで、同じ形状のポリゴンモデルを制作している。さらに、ノードの位置に質点を、エッジの位置に仮想的な「ばね」を設定し、物理演算を行うことによって、曲げた時の紙の挙動をある程度再現できるようにした。質点-ばねモデルによる再現は、布のシミュレーションで一般的に使用されているものであり、今回はそれを応用した。

## 2.2 工程 2：接続点の入力

作業者はデジタルペンで指定した閉曲線に沿って紙を切り取り、紙を曲げるなどの加工を行う。そして、紙の一部を重ね合わせたうえで、デジタルペンによって接続点を通過する「スキャン」操作を行う。スキャン操作を行うと、デジタルペンは「平面において離れている 2 つの領域に、極短時間のあいだに 2 本の線を引いた」と解釈可能な筆記データを生成する。実際にはこのような筆記を行うことは不可能であるため、工程 1 における輪郭線（閉曲線）を入力する場合と、スキャン操作を区別することができる。このスキャン操作を利用して、平面ポリゴンモデルにおける 2 点を連結する「接続点」を入力してもらう。接続点が入力された場合、本手法では 2 つの質点のあいだに短い「ばね」を追加する。これにより、複数の平面ポリゴン部品

を組み合わせたり、曲面を作成したりすることができる。

## 2.3 提案手法の利点と欠点

本手法を用いた場合、3D モデルをつくりたい作業者が行う操作は、自分の作りたい形状の図形を紙に対して記述し、接続したい 2 点を「スキャン操作」によって選択するだけでよく、マウスやキーボード操作は不要である。紙に対してペンで記述するという作業は単純であり、かつ 3D モデリングに関する複雑な知識を必要としない。そのため、コンピュータに不慣れな人も含めた多くの人が馴染みのある容易な作業であると思われる。このことから、この手法では幅広いユーザが、比較的容易にモデルを制作できるものと思われる。

また紙とペンを使用することによる利点もある。ペンデバイスは、マウスと比べると人間が正確に操作することができるものである。このことから、閉曲面の形状を指定する操作において、ユーザはより正確に、不快感なくイメージした形状を表現できると考えられる。特に、複雑な凹凸を持つような閉曲面の形状を入力する際に、デジタルペンはマウスよりも容易に入力が行えるという利点がある。記述対象が紙であり、破棄・交換が容易に可能であるため、実際に曲げる・折るといった試行錯誤が容易に行えると云った長所もある。さらに、紙という実物体を操作する感覚を伴うため、タンジブルかつ直感的なメディアという優位性もある。

その反面、提案手法では、折り方（山折り、谷折り）や曲率の設定といった、複雑な立体形状を制作したり、細かいディテールを表現したりといった操作は不得手だと考えられる。一つの理由としては、主要な入力が紙へのデジタルペン筆記であり、メニューなどが利用できないため、多様な入力パターンが用意できない<sup>\*1</sup>ことが挙げられる。前述したスキャンによって、入力パターンはある程度増やすことが可能であるが、マウスやキーボードを使用する手法と比較するとバリエーションを増やすことは難しい。改善

<sup>\*1</sup> 実線なら山折り、破線なら谷折り、のようなシンプルな機能追加であれば可能であると考えている。

策としては、おおまかな形状を作成する段階では紙とペンを用い、細かな調整についてはマウスを用い、画面の変化を観察しながら操作する方法が適切であると考えている。

### 3. 関連研究・関連システム

Modulobe [1] は、江渡らによって構築された物理シミュレーションに基づく仮想生物構築インタフェースである。シャフトとリンクというモジュールを組み合わせることで、仮想的な生物を 3D モデルとして簡単に制作できる。また制作したモデルを公開・共有するための Web プラットフォームを含んでいる。誰でも簡単に 3D モデルを作成し、コンテンツを流通させるという観点では本研究と共通している。Modulobe で作成可能なモデルは組み合わせるモジュールに依存するが、我々が提案する手法は紙への筆記に基づいており、創作の自由度は高い。

三谷 [2] は、折りたたまれた紙を撮影したデジタル画像から折りたたみ構造を認識し、計算機内にモデル化する手法を提案している。2 次元バーコードを表裏に格子状に複数印刷した紙を用い、折る操作を行うたびに撮影することによって、紙の構造を認識している。紙の状態を逐次記録し、3D モデル構成のための入力に用いるという点は類似性がある。ただし我々の手法は紙が重力で折れ曲がるといった、曲面を含むような形状についても構成できるという点が異なる。

その他の折り紙システムとして、田中ら [3] は、マルチタッチ操作を用いることにより、実際に折り紙を折る動作に近い操作で折り紙の体験ができるシステムを提案した。マウスによる操作よりも、実際に人が手で行う動作に近い操作で、計算機上のモデルを操作するという点は、我々の研究と類似性がある。

五十嵐らの Teddy [4] は、初心者でも容易に 3D モデルを作成することができる手軽な 3D モデリングツールである。画面に対して輪郭形状を描くことで、計算機が適切な 3D モデルを推測し出力する。3D モデルの出力はリアルタイムに行われ、視点の変更や、追記を行うことができ、対話的にモデリングが行えるツールとなっている。田中らの折り紙システムや Teddy に対して、提案手法は実在する「紙」に触れ、操作しながらモデリングを行えるという点が異なる。

入力デバイスを改良することによって、直感的なモデリングを可能にする研究として、脇田らが提案した pSurface [5] を挙げる事ができる。pSurface は、自由曲面のモデリングを行うことができる布製デバイスである。実際に手で変形させることで、その形状を入力することができる。また、マウス操作等によってモデルに行った修正を、実物体上にフィードバックすることもできる。pSurface も実体の操作により 3D モデルを操作することができる点は類似性があるが、センサやアクチュエータの制約により、作成可能な

形状は本提案手法に比べると限定される。

高見らは、複数の道具型デバイスを活用する複合現実型木材加工システム [6] を構築している。拡張現実空間における 3D モデル構築作業を行うにあたって、ナイフやハンマといった実世界で用いる道具に類似した、特殊なデバイスを用いることによって、直感性や操作性の向上を図っている。我々はデジタルペン以外の特殊なデバイスは用いていないが、紙に対する慣れ親しんだ操作を用いることによって、作業の直感性や操作性を向上させる点は類似している。また、提案手法においてデジタルペンのペン先をカッターナイフに切り換えることで、より直接的な作業感覚が得られる可能性もある。

実物体から手軽に 3D モデルを構成するシステムや手法として、KidCAD や Scan Modeling がある。KidCAD [7] は、ゲル状のテーブルトップ型デバイスに押し付けたおもちゃ等の物体の 3D 形状とテクスチャをスキャンするシステムである。Scan Modeling [8] は、Wakukon と呼ばれる枠デバイスに実物体を通過させることで、その断面をもとに 3D モデルを構成する手法である。これらの手法は押し付けた面、または断面の形状のみをモデル化するため、内部に空洞を含むような物体については再現することはできない。これは既存の 3D スキャナについても同様である。提案手法は 2 次元の紙モデルを組み合わせることで 3D モデルを構成するため、内部に空洞を含む複雑な形状についても再現することができる。

### 4. 実装

提案手法の有効性を検証するため、システムを構築した。システムは図 2 に示すように、左側の輪郭線表示ウィンドウと、右側の 3D モデル表示ウィンドウに分かれている。左側の輪郭線表示ウィンドウでは、デジタルペン筆記によって入力された輪郭線を表示するほかに、マウスによって輪郭線を入力することも可能である。なお、新しい輪郭線が入力されると、現在表示中のタブが空であるか調べ、もし空であれば現在表示中のタブに輪郭線を表示する。そうでなければ新しいタブを開いて表示する。右側の 3D モデルは、すべての輪郭線から生成した平面ポリゴンモデルを表示する。もし接続点が入力されていると、図 3 に示すように、接続情報を反映したポリゴンモデルを表示する。複数の輪郭線が入力され、接続されている状況を図 4 に示す。接続点を増やしていくことで、図 5 のような半分閉じた立体を作成することもできる。接続点は左側の輪郭線表示ウィンドウにおいて、マウスで設定することもできる（黄色の点が接続点）。マウスを用いた場合、左側の輪郭線表示ウィンドウの既存の接続点をクリックすることで、接続を解除することができる。これにより、3D モデルを観察しながらのインタラクティブな操作が可能となる。

以下、システムの実装における詳細な処理について説明

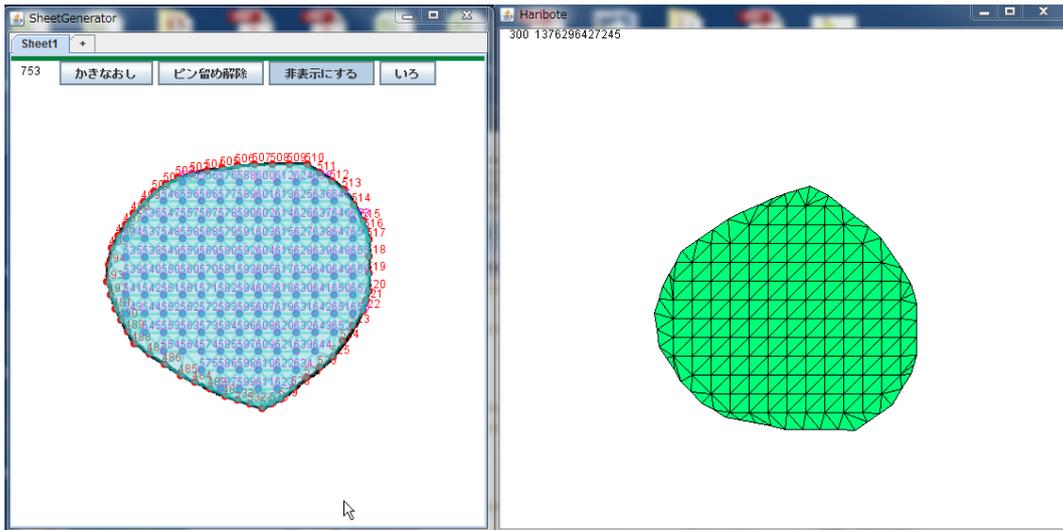


図 2 輪郭線の描画

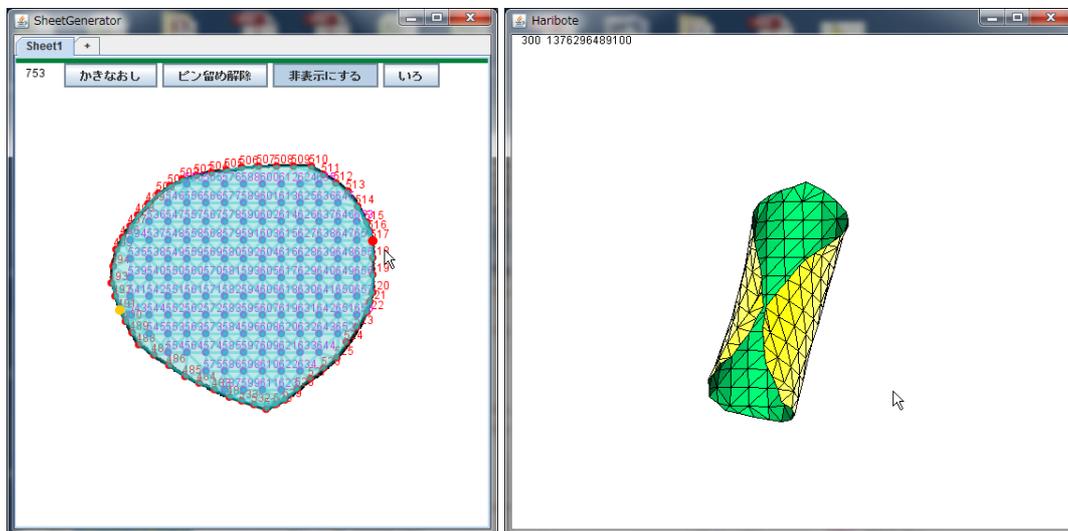


図 3 接続点の追加

する。

#### 4.1 輪郭形状の入力

ペンによる入力、または輪郭線表示ウィンドウでのマウスドラッグによって、輪郭形状を作成する。ペンによる入力の場合は、複数のストロークで構成される筆記についても、それぞれの始点と終点の距離がしきい値以下であれば接続する。そのうえで、必ず閉曲線を作成する必要があるため、始点の座標を最後に追加する。

#### 4.2 輪郭形状からの平面ポリゴンモデルの作成

入力された閉曲線に含まれる座標点の集合をもとに、代表的な点を抽出し、外周点とする。外周点の抽出にはRamerの方法を用いた。

つぎにポリゴンモデル化するために、閉曲線の内部に格子状の点を設定する。最初に筆記のバウンディングボックス

（矩形領域）を求め、その矩形領域内に格子点の候補を配置する。格子点の候補ごとに閉曲線の内部かどうかを判定する。内部かどうかの判定は、以下の方法で行った。はじめに輪郭形状に干渉しないようランダムに設定した遠方の点と、格子点を結ぶ線分を計算し、その線分と閉曲線が何回交差したかをカウントする。交差の回数が奇数であれば候補点は内部、偶数なら外部と判定する。さらに、候補点が閉曲線から一定距離以上離れているかどうかを調べ、しきい値よりも離れている場合のみ、格子点として登録する。

ここまで求めた外周点および内部格子点をノードとして、三角形を構成してポリゴンモデルを作成する。接続に関しては、次のような手順で行った。まず、隣り合った外周点同士を接続した後に、内部格子点同士を接続する。まず、任意の二つの内部格子点について、距離が格子間隔と同じかそれ以下であれば接続を行う。これにより、内部格子点同士を平行・垂直なエッジで結ぶ。次に、距離が格子

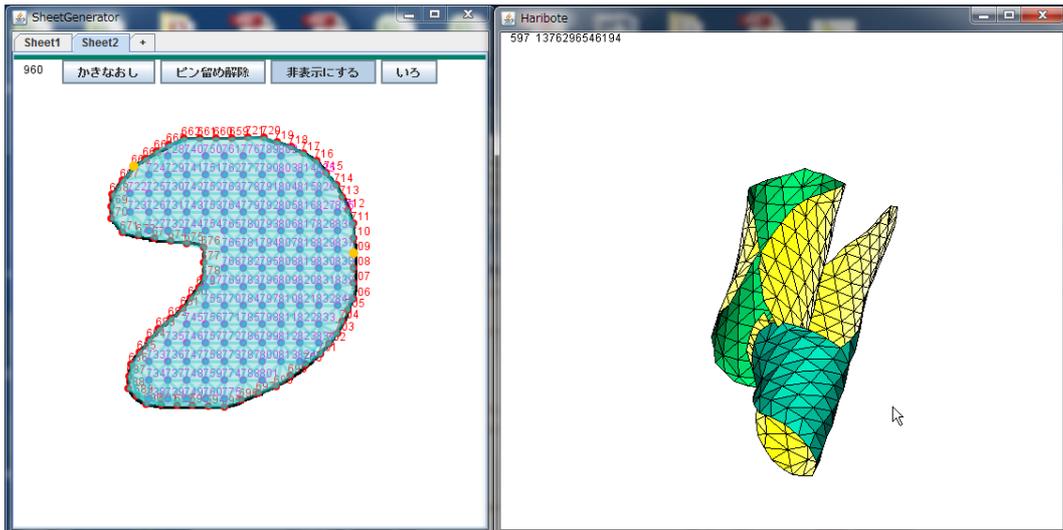


図 4 複数の輪郭形状の接続

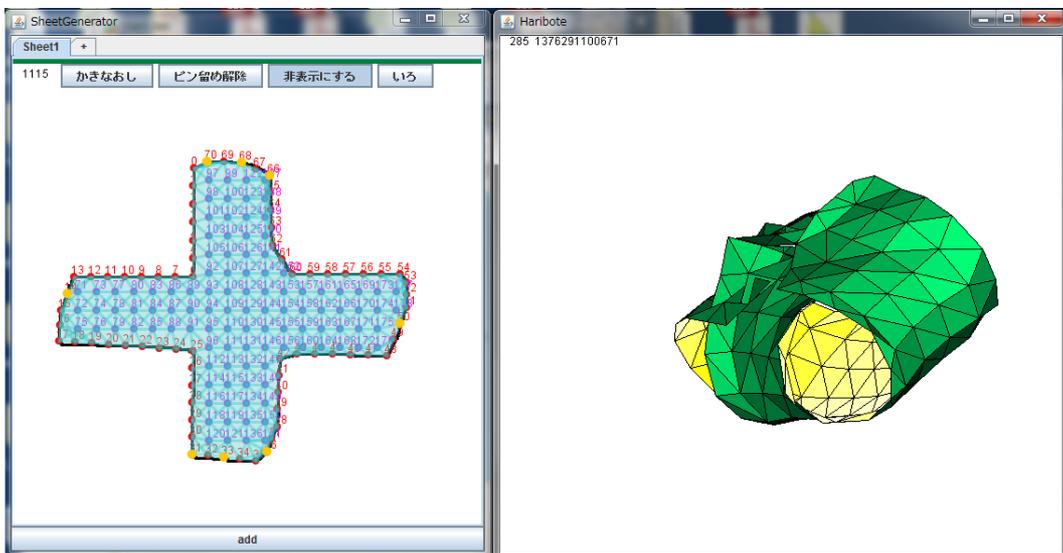


図 5 複数の接続点による箱型の形状

間隔  $\times\sqrt{2}$  である場合に接続を行う。これにより、内部格子点間を斜めに接続する。ただし、既にエッジが張られている場合は、交差するエッジは張らない。次に、外周点と内部点の接続を行い、最後に、外周点同士の接続を行う。ただし、閉曲線の外側でエッジを張らないようにするために、前述の閉曲線内部判定を行いながら実施する。エッジを追加した後に、ポリゴンとなる三角形を抽出する。すべてのエッジについて、端点となる二点のノードに着目する。一方のノードに接続されているエッジ全体と、もう一方のノードに接続されているエッジ全体について、最初に着目したノードで無い方の端点を調べる。反対側の端点が接続していれば、その点を含めた3つの端点を頂点とした三角形を生成する。これを再帰的に適用していく。

#### 4.3 平面ポリゴンモデルから3Dモデルの作成

生成した平面ポリゴンモデルを、質点とばねによる3D

モデルへ変換する。ノード位置に質点を置き、エッジを質点間のばねに置き換える。その際、ばねの自然長は平面ポリゴンモデルにおけるエッジの長さとする。

さらに、紙の性質を表現するためにばねを追加する。これを追加しないと、紙の「ハリ」を再現することができず、3Dモデルの三角形同士が折れて重なってしまう。そこで、全てのノード間について、距離が格子点間隔  $\times 3.3$  より大きく、格子点間隔  $\times 3.7$  より小さい距離のノード同士を、追加の「ばね」で接続した。

#### 5. おわりに

デジタルペンを利用した3Dモデリング手法を提案した。紙とペンという慣れ親しんだ要素を用いることにより、これまでよりも幅広い方々に3Dモデリング環境を提供する基盤を提供できる。手法の有効性を確認するため、システムとして構築し、紙とペンに基づく基本的な操作お

よびインタラクティブな接続操作の有用性を確認した。

今後の課題として、表現力の向上により、作成可能なモデルの種類を増やすことが挙げられる。現在のシステムでは「折り」や「曲げの曲率」を設定することができないため、システムが出力するモデルが実際の紙と異なる場合が多い。デジタルペンによる紙への操作という直感性を活かしつつ、複雑な形状を作りたいという多様なニーズにどうやって対応するかが今後の検討課題である。

**謝辞** 本研究の一部はJSPS 科研費(課題番号 23680078)の支援によるものです。

## 参考文献

- [1] Eto, K., Hamasaki, M., Watanabe, K., Kawasaki, Y. and Nishimura, T.: Modulobe: a creation and sharing platform for articulated models with complex motion, *Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE '08*, New York, NY, USA, ACM, pp. 305–308 (online), DOI: 10.1145/1501750.1501823 (2008).
- [2] 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(画像情報), 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 8, pp. 2859–2867 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110006386514/>) (2007).
- [3] 田中建伍, 山下笑香, 田邊浩亨, 川上武志, 笹倉万里子: 携帯機器上で鶴を折るためのマルチタッチ操作の提案, 情報処理学会インタラクシオン 2013, pp. 183–188 (2013).
- [4] Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H.: Teddy: a sketching interface for 3D freeform design, *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '99)*, New York, NY, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 409–416 (online), DOI: 10.1145/311535.311602 (1999).
- [5] 脇田 玲, 上野道彦, 中野亜希人: pSurface: 自由曲面モデリングとアニメーションのための布製入出力デバイス, 情報処理学会インタラクシオン 2011 (2011).
- [6] 高見雄介, 木村朝子, 柴田史久: 複数の道具型デバイスを活用する複合現実型木材加工システム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 14, No. 1, pp. 141–150 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/40019532630/>) (2012).
- [7] Follmer, S. and Ishii, H.: KidCAD: digitally remixing toys through tangible tools, *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, New York, NY, USA, ACM, pp. 2401–2410 (online), DOI: 10.1145/2208276.2208403 (2012).
- [8] Oe, T., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Scan Modeling: 3D Modeling Techniques using Cross Section of a Shape (2012).