

マウスによる仮想折り紙の対話的操作のための 計算モデルとインタフェース

古田 陽 介[†] 木本 晴 夫^{††}
三谷 純^{†,†††} 福井 幸 男[†]

本論文ではマウスのみでも直感的、対話的に複雑な折り紙形状をモデリングできる計算モデルとインタフェースを提案する。近年の計算機の高性能化にともなって一般家庭のPCでも3DCGアニメーションが扱いやすくなったため、これを用いたより分かりやすい折り手順の伝達方法が研究されている。しかし、既存のモデリングソフトで折り手順を示すための3DCGアニメーションを作ることは、非常に手間のかかる作業である。なぜならほとんどのモデリングソフトでは、折り紙の各面の幾何形状と面どうしのつながりを同時に保ったまま個々の面を動かすようなことができないためである。そこで本論文で提案する手法では折り紙の面の形状とつながりを計算するためにバネモデルを用い、さらにマウスで直感的に面の分割や回転操作を行うための、2Dドローツールを参考にした折れ線生成インタフェースや、面を折り曲げる際の回転軸、回転角を決定するための手法を提案する。実際に本手法を計算機上に実装し、これまでモデリングすることが難しかった複雑な形状、折り操作を計算機上で再現できることを確認した。

Computer Model and Mouse Interface for Interactive Virtual Origami Operation

YOSUKE FURUTA,[†] HARUO KIMOTO,^{††} JUN MITANI^{†,†††}
and YUKIO FUKUI[†]

We propose a new method of modeling and interface for interactive virtual Origami operation that enables a user to handle a complex Origami model intuitively using a common mouse. Although 3DCG animation has become popular in recent years with the progress of performance of common PCs, designing 3DCG animation of folding process of Origami is still difficult and time consuming task. Because it is hard for them to move each Origami face with keeping its shape and connection. Then, the modeling method we propose uses the spring-mass model to express shapes and connections of an Origami model in a computer. The interface we propose uses simple mouse operations. The main operation that generates folding lines works similarly with 2D drawing tools. Additionally, we propose new interfaces for specifying the axis and the angle for rotation. We implemented the method on a PC and we found that we can reproduce complex Origami shapes intuitively using a simple mouse.

1. はじめに

日本では折り紙は単なる遊戯と認識されていることが多い。しかし折り紙は古くから幾何学との関連性が知られており、学際領域では数学の世界を中心として以前から研究が進められてきた。近年では工学の分野

への応用に関する研究もさかんに行われるようになり、自動車のエアバッグの折りたたみ¹⁾やドーム建築物の屋根の収納法²⁾などにその研究成果が応用されている。

また、近年では任意の形状を展開図化するための「設計」と呼ばれる手法が発明され、非常に複雑な折り紙作品が多数創作されるようになった。しかし、それともなっていくつかの問題が発生している。1つは創作した作品の折り手順を残すために大変な手間がかかるようになった点、そしてもう1つは、そのような作品を実際に折る際に、実際の紙で多数の試行錯誤を繰り返さなければならないという点である。

折り紙は、折り方さえ知っていれば身近な素材でだれでも作品作りを楽しめることから、現在では世界中

[†] 筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering,
University of Tsukuba

^{††} 名古屋市立大学大学院芸術工学研究科
Graduate School of Design and Architecture, Nagoya
City University

^{†††} 科学技術振興機構さきがけ
PRESTO, Japan Science and Technology Agency

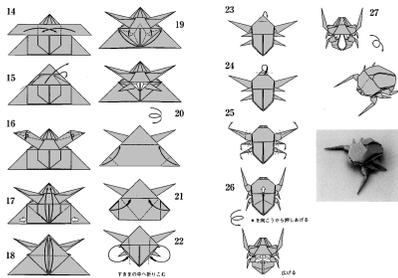


図 1 テナゴカガネの折り図³⁾

Fig. 1 Detailed sequence of diagrams for folding a Long-armed beetle³⁾.

で楽しめるようになっていいる。しかし逆に、折り手順が分からない場合はその作品を作ることが非常に難しく、そのような作品はまったく広まらずに時間とともに失われてしまう場合が多い。そのため多くの折り紙作家は、自分の作品の「折り図(図1)」を描いてその折り手順を記録してきた。折り図とは操作を加えたことによる紙の形状変化を1ステップずつ図に描いて示したものであるが、近年では完成まで何百ステップも要するような複雑な作品も多数発表されるようになり、そのような作品の折り手順を描くことが折り紙作家にとって大きな負担となっている。また、作家が作品を生み出すためには、多数の試行錯誤を行わなければならない。しかし複雑な形状を得るために実際の紙で試行錯誤を繰り返すことは、手間や紙の強度の面から限界がある。

そこで、近年では計算機上の三次元仮想空間を利用した折り紙支援システムの開発が期待されている。計算機では情報を簡単に編集・保存したり、失敗してもやり直しが容易に行えたりすることから、上記の問題を解決するために利用可能であると考えられる。また、ここで得られた折り紙の三次元モデルをアニメーション化することで、見る人は任意の位置から対象を観察することができるようになる。それは折り手順を図に描いたものや、折っている様子をビデオカメラで撮影したものと比べて、見る人に対してより分かりやすく情報を提示することができるだろう。

現在では三次元モデルを作るためのツールとしていくつかのモデリングツールが市販されているが、それらは折り紙のような形状の編集はほとんど想定されておらず、非常に使いにくいものとなっている。折り紙には個々の面の形状が一定であるなどの物理特性があるが、これらのツールではそれらの制約を考慮した編集が行えないため、ツールの使用者は手動で面の形を整えたりする必要があった。通常そういった処理を行うためには紙の変形を物理シミュレーションなどで

計算する必要があるが、そういった機能が搭載されたモデリングソフトはほとんどなく、また、実時間でシミュレーションを行ったり、あるいはシミュレーションの計算を行っている最中にモデリングを行ったりできるようなものは市販されていない。

そこで本研究では折り紙の形状をパネで表現し、パネモデルに基づくアルゴリズムで形状をシミュレーションする手法を提案し、それによって計算機内で折り紙の形状の構築を容易に行えるようにするとともに、仮想空間で折り紙を折る過程の再現も目指す。本手法を用いることにより、複数の面が三次元的かつ連鎖的に移動するような複雑な場合でも、計算機を使って実時間で計算を行うことが可能となっている。また、計算の終了を待たずに並行してモデリング操作も行えるという特徴も備える。

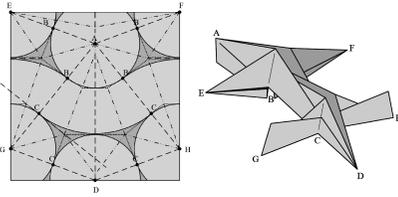
また折り紙を計算機上でモデリングするうえでもう1つ問題となるのが、入力装置の問題である。一般に、紙を折るという動作には両手が必要となる場合が多いが、10本の指の動きを計算機内に取り込める装置はあまり一般的ではない。そのため多くの場合はマウスやキーボードという限られた情報しか入力できないデバイスを利用しなければならないが、そのような環境においても直感的かつ効率的にモデリングを行えるようなインタフェースを提案する。一般に紙を折る場合は折り目を付ける動作と面を折る動作を同時に行うが、本手法ではその2つの動作を別々に行うこととし、それらを自然に統合することで、ユーザはマウスなどでも直感的で自由な折り操作が再現できるようになった。

本研究は紙の形状変化の実時間シミュレーションを行うための計算モデルとアルゴリズム、および折り操作を計算機上の仮想空間内で行うためのインタフェースを提案するものである。本論文の2章では関連する研究を紹介し、3章では提案手法の詳細について述べ、4章では実験と結果、5章では考察と今後の展望を述べる。

2. 関連研究

折り紙についての研究として、複雑な形状を折り出すための設計手法に関するものが近年活発に発表されている。代表的なものとして、正方形の領域内に円を配置することで意図した長さの角を折り出すことを可能とする設計手法(円領域分子法)⁴⁾が目黒によって考案された。これは、Langによってソフトウェアへの組み込みが実現し、その詳細が文献5)にまとめられている(図2)。

計算機上で折り紙を扱う研究としては、内田らの展



円のバックギン問題を解くことで正方形の紙から任意の長さの角を折り出すことができる。

図 2 折り紙設計の例⁵⁾

Fig. 2 Example of Origami design⁵⁾.

展開図から折り上がる形状を推定するアルゴリズムに関するものがある⁶⁾。設計技術の進歩によって複雑な形状が折り上がるようになったが、それにともない展開図も複雑化している。そのような展開図に対しても適切な折り上がり形状を短時間に予測できるような手法について現在も研究が進められている。

Miyazaki らは計算機を用いて折り紙を対話的に操作する手法と、それによって折り紙の形状が逐次変化する際のデータ更新の手法を提案している⁷⁾。この研究で目指しているものは本研究と非常に近いが、この論文で用いられている幾何学的制約に基づく形状計算手法では同一平面上にない複数の面の動きを計算できず、面が相互に作用しながら三次元的に形状が変化する場合には適応できない。また、この研究で得られたプログラムは折り手順を記録し任意に再生することが可能であるが、先の制約によって手順そのものが実際のものとは異なっている場合が多い。本研究では三次元的な形状変化にも対応し、そのため実際の折り手順に近い状態をシミュレーションすることが可能である。3.2 節と 4 章で述べる。

Tachi は折り紙をヒンジで結合された剛体面の集合であるとして、幾何学的な拘束条件から面の三次元的な運動を求めている⁸⁾。この手法を用いることで展開図から折りあがり形態への滑らかなアニメーションを得ることができるが、数学的に厳密であるがために自由度が非常に少なく、折りあがるまでにわずかも擦れが発生するような動きのアニメーションを求めるためには、あらかじめ擦れが発生する面を分割しておく必要がある。本手法ではバネモデルに基づいているため柔軟性が高く、途中で面の擦れが発生するような面の動かし方であってもシミュレーションすることが可能である。

三谷らは、折り紙の構造を分かりやすく表示するための計算機を用いたデフォルメ手法を提案している⁹⁾。この手法を適用するためにはあらかじめ面の重なり順を求めておく必要があるため本研究に直接適用するこ

とはできないが、折り紙の形状を分かりやすく伝えるという目的のためには非常に有効であるといえる。

計算機上に折り紙形状を取り込む研究としては、Kato らによる「折り図」の画像をもとにした手法があげられる¹⁰⁾。Kato らの手法では、折り図画像に含まれる矢印や折れ線の情報を計算機で解析することによって折り操作を推定し、それをもとに計算機内の折り紙モデルを更新している。また、三谷は二次元バーコードを印刷した紙を折ったものをカメラで撮影し、その写真をもとに折り畳み構造を推定しモデルを構築する手法を提案している¹¹⁾。しかしこれらは他の媒体を計算機で解析するという手順をふまなければならないため、直感的かつインタラクティブであるとはいえない。本論文で提案する手法では、ユーザは計算機上のモデルを直接操作することができるため、より直感的かつインタラクティブに操作することが可能である。詳細は 3.3 節で述べる。

バネモデルを用いた形状計算手法の中には商用 3D モデリングソフトの布シミュレータに用いられているものがある¹²⁾。しかしこれは対象が布であるため面の平面性をほとんど考慮していない点と、ユーザが対話的に折り筋を入力したり面を動かしたりするインタフェースがない点などにより、折り紙形状を構築する用途に適しているとはいえない。

3. 提案手法

3.1 概要とデータ構造

本システムを実行すると、画面内の仮想空間内に紙を模した正方形のポリゴンが表示される。これに対してマウスで折り目の生成や面の回転などの操作を繰り返し加えることで、紙の折り操作をシミュレートする。折り紙モデルの各面はつねに同じ形を維持するよう対角線上にバネが張られており、面を動かした際に隣接する面が大きく歪むことを防いでいる(図 3, 図 4)。なお、バネの配置はシステムを初期化した際と、ユーザによって折り目が生成され、折り紙モデルを構成する面の個数や頂点数が変化した際に実行される。ユーザはマウス操作で面を動かすことができ、その操作と同時にバネモデルによる形状計算を行い画面を逐次更新するため、ユーザは計算機上で実際に折り操作を行っているかのような操作感を得ることができる。

システムは内部に複数の頂点クラスと辺クラス、面クラスを持っており、頂点クラスは三次元座標を、辺クラスは始点、終点を表す 2 つの頂点クラスへの参照を、面クラスは辺で囲まれた閉領域を表し辺への参照を 3 個以上保持している。辺クラスは 2 つの面から

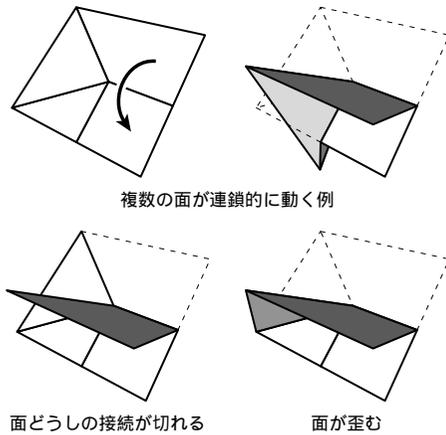


図 3 面の千切れ・歪み

Fig. 3 Crack and distortion of faces.

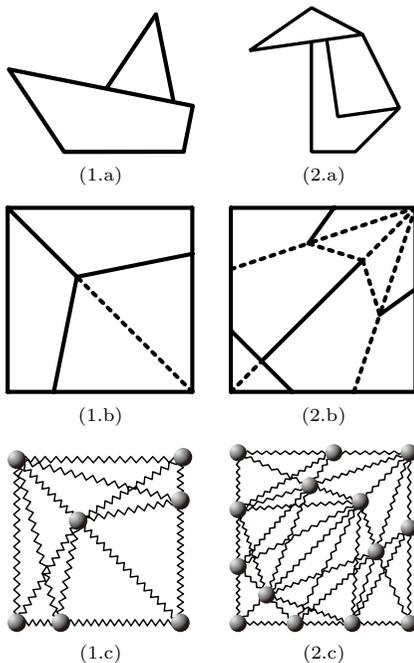


図 4 船 (1.a) とペンギン (2.a) の展開図 (b) とバネモデルによる形状表現 (c)

Fig. 4 Crease pattern (b) of Ship (1.a) and Penguin (2.a), and expression of shape by spring models (c) of them.

参照されているかどうかで分類することができ、2つの面から参照されているものは折れ線クラス、1つの面からのみ参照されているものは境界クラスとする。計算機内の折り紙モデルは複数の面クラスで構成されており、それらをもとに仮想空間内に3Dポリゴンモデルとして表現される。なお、本論文では穴の開いた面、凸型ではない面の生成については対象としない。

3.2 立体的な折り紙の形状維持

折り紙の面は辺による閉領域で定義され、折り操作は面の移動と回転で表現することが可能である。しかし場合によっては1度の折り操作で複数の面が連鎖的に動くことがあり、各面の幾何形状や面どうしの位相を考慮して適切に移動させなければ、面が千切れたり歪んだりしてしまうことがある(図3)。一般的な物理シミュレーションを用いてこの運動を解析する場合、紙が変形しないという条件でこの問題を解くことになり、剛体のキネマティクスを解かなければならず実時間での計算は困難である。

そこで本研究では、面を構成するすべての頂点間に網羅的にバネが張られているというモデルを採用し(図4)、面の微小な歪みは許容しつつ、大きく面が歪んでしまった場合にはバネが釣り合おうとする力を繰り返し計算することで頂点を適切な位置へと移動させることとした。具体的なバネ計算のアルゴリズムは以下のとおりである。

一般的なバネモデルでは、ある頂点 i にかかる力 F_i を、式(1)で表すことができる¹³⁾。

$$F_i = \sum_j \left\{ k \left(1 - \frac{L_{ij}}{|r_{ij}|} \right) r_{ij} + Dv_{ij} \right\} - mg \quad (1)$$

ここで k , L_{ij} , r_{ij} , D , v_{ij} , m , g は、それぞれバネ定数、バネの自然長、頂点 j に対する頂点 i の相対位置、ダンパ定数、頂点 j に対する頂点 i の相対速度、頂点の質量、重力加速度である。なお、本システムでは上式を簡略化し $k = 1$, $D = 0$, $m = 1$, $g = 0$ とした式(2)を使用している。

$$F_i = \sum_j \left(1 - \frac{L_{ij}}{|r_{ij}|} \right) r_{ij} \quad (2)$$

式(2)の運動方程式を数値的に解くことで頂点の位置の時間変化を計算でき、面の位置と形状が定まる。運動方程式の数値計算はオイラー法により行う。具体的には、式(3)、(4)により Δt 秒後の頂点 i の位置 r_i と速度 v_i を計算できる。

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + d \frac{F_i(t)}{m} \Delta t \quad (3)$$

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i(t) \Delta t \quad (4)$$

ここで d は減衰定数であり、0以上1以下の値を指定する。本システムでは $d = 0.2$ とし、また $\Delta t = 1$ とした。

なお、上記のアルゴリズムによる形状の変化は連続的であるため、値の収束を待たずに途中で計算を打ち

切っても、近似値をユーザに提示することが可能である。そのため画面書き換え時間内に計算を終了させることができ、素早い応答を返したり、実時間アニメーション化したりすることが容易である。さらに、このアルゴリズムは条件分岐がほとんどない単純なものであるため、計算機を用いた高速化は比較的容易である。そのため本研究のようなシミュレーションに適している。

なお、本手法では全体を構成する個々の面を歪みのない形状へと連続的に変化させていくことで全体の形状を得ている。隣接する面どうしは複数の頂点を共有しているため、他の面との制約を考慮しなくても、それぞれの面の形状が元の形に戻れば他の面も自動的に正しい位置へと移動する。そのためバネを張るのは同一の面内にある頂点どうしのみでよく、違う面に存在している頂点との間にはバネを張る必要はない(図4(c))。

3.3 マウスオペレーション

現実の折り紙において紙を折る操作は、「角を合わせる」動作と「圧力をかけて折り目をつける」動作の組合せであることが多い。しかしこれらの動作は両手が使えることが暗黙の前提となっており、片手だけでこの動作を行うことは難しい。

紙の折り方には多くの種類が存在するが、それらはある面の回転とそれに付随する隣接面の動きで表現できる場合が多い。また、あらかじめ空間上に軸を設定しておけば、回転は二次元変換で表現することが可能である。

そこで本システムでは紙を折る操作を「紙に折り目をつける」操作と「折り目に沿って面を回転させる」操作に分割し、それらを組み合わせることで現実の折り操作をシミュレートすることとした。あらかじめ必要な折れ線をいくつか生成した後、そのうちの1つを実際に折る軸として、明示的に回転させると、残りの面もバネモデルに従って移動するようになっている。また折れ線の生成や軸となる折れ線の選択と回転角の決定は一連のマウス操作に対応した形で自動的に行われるため、ユーザはそれらを意識することなく直感的に面を操作することが可能である。以下でこれらの操作について詳細を述べる。

3.3.1 折れ線の入力

紙を折ることを対話的に行うためには、ユーザが自由に、かつ少ない手順で折り目をつけられることが望ましい。そこで本システムでは紙に折り目をつける操作(平面に折り筋を入力する操作)に2Dのドロウツールを参考としたインタフェースを採用した。一般的

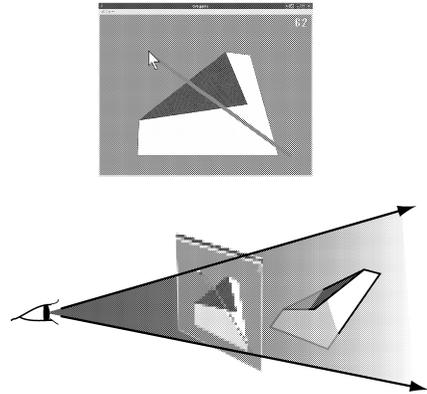


図5 折れ線の入力
Fig. 5 Input folding lines.

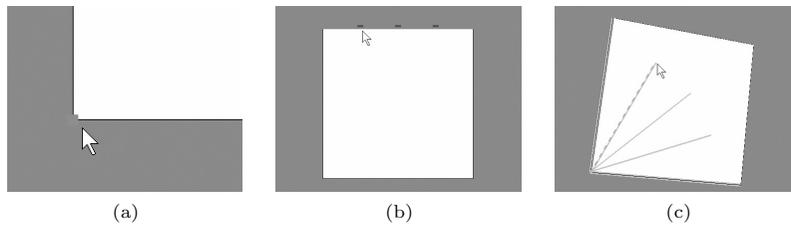
ドロウツールではキャンパス上をマウスでドラッグすると軌跡が線となって描かれるが、本システムでも画面上の任意の場所をドラッグして線を引くことによって、ユーザは面のどの場所にも自由にかつ対話的に折り目を「描く」ことが可能となっている(図5)。その手順は次のとおりである。

1. マウスでスクリーン上をドラッグし、ドラッグの始点と現在のマウス座標を結ぶ直線をスクリーン上に描画する。
2. 始点、終点に対応する仮想空間上の三次元座標を求め、視点から両点を通り奥へ無限に伸びる2本の半直線を仮想空間上に生成する。
3. 2本の半直線の間にはさまれた三角状の領域を定義し、その領域とすべての辺との交差判定を行う。
4. 交点に新たに頂点を配置し、その頂点を結ぶように面分割を行う。
5. 分割後の面に対してバネを張りなおす。

重なり合った面に対して折り目を描いた場合は、それらすべての面に新たに折れ線が追加される。また頂点付近や辺、角を等分する場所の付近では自動的にスナップするため(図6)、実際に紙を折るよりも正確で、容易に計算機内の紙に折り目をつけることができる。なお、本論文では面を完全に分割しない折れ線(図7)の生成については対象外とした。これにより、生成される面はすべて凸多角形となる。

3.3.2 回転面と軸の選択

経験的に、人はドアを開くときにテコの原理による労力軽減を期待して蝶番からできるだけ遠い場所に力点を置くことが多い。本システムではその動作を参考として、面を選択すると同時にポインタ位置から人間のイメージする軸の位置を予測し、自動的に選択する



- a. カーソル座標と頂点座標の距離が閾値以下の場合にはカーソル座標を頂点座標へ一致させる。
- b. カーソル座標と辺を n 分割する点との距離が閾値以下の場合にはガイド (辺上の点) を表示し、カーソル座標をその位置へ一致させる。
- c. 始点が頂点でありかつ現在のマウス座標が始点の角を n 等分する点に近い場合はガイド (n 本の点線) を表示し、カーソル座標をその位置へ一致させる。

図 6 カーソル座標の近似

Fig.6 Approximate the cursor coordinate.

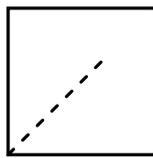


図 7 完全に面を分割しない折れ線の例

Fig.7 Example of a folding line that doesn't completely divide a face.

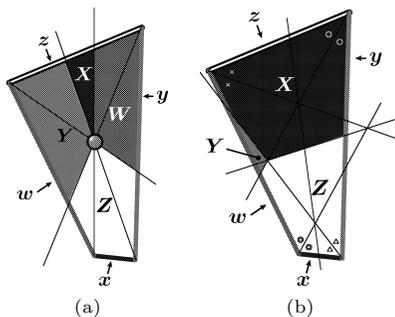


図 8 クリックした領域と選択される軸の関係

Fig.8 Relation between clicked area and selected axis.

こととした。しかし、現実の動作をそのまま逆転させ、ポイントから一番遠いところにある折れ線を軸とするのは適当ではない場合がある (図 8 (b))。そこで本システムでは以下のような手順で「面の中心から見て、クリックした位置の反対側にある折れ線」を求め、それを軸とすることで人間のイメージする軸を効果的に予測する。

1. 仮想空間上の紙をクリックし、ポイントの位置に対応する面のうち一番視点に近い面 F を取得する。
2. クリックした位置の三次元座標 P_{click} と面 F の重心 P_{center} を求める。
3. P_{click} と P_{center} を通り、 F に垂直な面 G を定義する。

4. F を構成するすべての折れ線について、 G と交差判定を行う。
5. 交差していた折れ線のうち、 P_{click} から最も遠いものを軸とする。

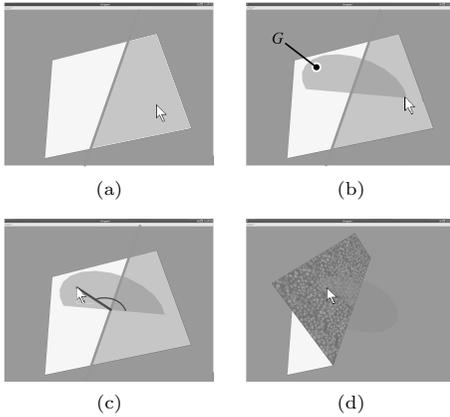
本アルゴリズムにおいて、ある折れ線と、その折れ線が軸として選択されるクリック位置との関係を図示すると図 8 (a) のようになり、たとえば P_{click} が領域 X 内であれば、軸として選択されるのは折れ線 x となる。ちなみにマウスポイントから一番遠いところにある折れ線を軸とするアルゴリズムでも同様に関係を図示すると図 8 (b) のようになり、人間の意思にかかわらず軸として選択できない折れ線 (図中では w) が存在してしまうため、このアルゴリズムは適当ではないといえる。

なお、本手法では選択面の中に軸となる折れ線が含まれていることを想定しているが、面を構成している辺以外を軸としたい場合もあると考え、実際のシステムの中では軸としたい折れ線をマウスでクリックすることで、手動による軸の指定も行えるようになっている。

3.3.3 回転角の決定

面の回転は、仮想空間上の面をマウスで選択した後ドラッグするというインタフェースで実行される。面を選択し軸を決定した後、軸に垂直で上記の P_{click} を通るような平面 G を定義し、そのままマウスをドラッグさせると、 G 上でマウスに対応する三次元座標を通るように回転角を決定し、面を回転させる (図 9)。この処理によって仮想空間内にある操作対象の面と画面上のポイントの位置が感覚的に一致するため、ユーザは直感的に回転操作を行えるようになっている。

なお軸と視線が垂直に近い角度で交わっている場合、カーソルの微小な移動が回転角に大きな影響を与えてしまい、回転の制御が困難になる。そのような場合



- 面をクリックして選択し，軸を決定する．
- クリックした点を通り軸に垂直な平面 G を定義して， G 上に円盤を表示する．
- マウスをドラッグすると，カーソルの位置に応じて回転角を決定する．
- 軸を中心として，面を回転させる．

図 9 面回転

Fig. 9 Face rotation.

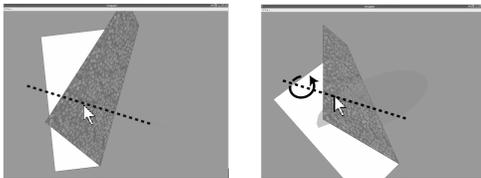


図 10 視点移動

Fig. 10 Viewpoint change.

は一時的に視点を移動させ軸と視線が垂直にならないようにする．このときの視点の移動は上記の P_{center} , P_{start} を通る直線を軸とする回転移動とすることで，マウスの位置と仮想空間上の紙の位置がずれないようにしている (図 10)．

また，マウスボタンを押した際には軸に垂直でマウスボタンを押した位置を通る円を表示させ，面がその軸を中心として回転することを直感的に意識しやすいようにしている．

3.4 押しつぶし

本システムでは回転操作を主体としてモデリングを行うが， 180° に満たない中途半端な回転を繰り返すことによって形状が意図せず立体的になってしまうケースが発生する．現実の折り紙でも紙の塑性のよって同様に形状が立体的になってしまう場合があり，そのような場合には圧力を加えて形状を平面に戻すことがある．

そこで本システムでも仮想空間上の紙に対して任意のタイミングで仮想的な「押しつぶし」操作を行える

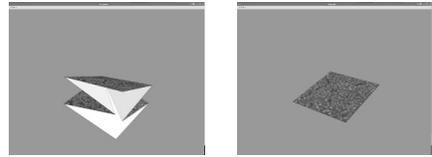


図 11 押しつぶしの実行結果

Fig. 11 Result of press operation.

ようにし，紙を平面に保つことを可能とした (図 11)．

実際のプログラム中では各頂点の z 座標を制約に関係なく単純に減少させているだけなので，場合によっては個々の面が変形してしまうことがある．そのためこの処理によって平坦に変形された形状に対しては再度バネ計算を繰り返すことを行うことによって正しい形状に復元することとしている．

4. 実験と結果

提案手法の有効性を示すために，被験者に本システムと既存のモデリングソフトを利用し，実際に折り紙モデルのモデリングタスクを実行してもらい，使用感についてアンケートを行った．作成する折り紙作品は「オルガン」とした．これは図 12 の折り図に示すような 11 ステップの折り手順によって作成される古典的な折り紙作品であるが，本実験ではこの図中の各ステップで図示されているイラストと同形状の三次元モデルをすべて作成してもらい，それらすべての形状のモデリング作業が完了するまでに要する時間を計測した．被験者は日常的に計算機を用いた研究をしており，基礎的な CG・CAD の知識は保有しているが，モデリングソフトを用いた三次元モデルの生成はほとんど経験がない，22-23 歳の男女 8 人とした．比較対象として利用した三次元モデリングソフトはシェアウェア版の Metasequoia 2.4.2¹⁵⁾ で，以下の環境で実験を行った．

Model: Dell Precision 690

CPU: Intel Dual-Core Xeon 5150 (2,666 MHz)×2

RAM: PC2-5300 DDR2-FBDIMM (667 MHz, 4 GB)

GPU: NVIDIA Quadro FX 3450 (VRAM: 256 MB)

図 13 は，各被験者の所要時間をまとめたものである．Metasequoia を用いてオルガンの折り手順をモデリングした際は平均して 1,243 秒を要したのに対し，本手法では被験者 A が 264 秒と $1/4$ 近くに短縮しているのははじめ，平均して 457 秒と $1/3$ 近くの時間でタスクを完了することができた．

また，図 14 および図 15 は被験者 A が実際にモデリングを行っているアプリケーション画面をキャプチャしたもので，紙を折り開いてオルガンの足を作っ

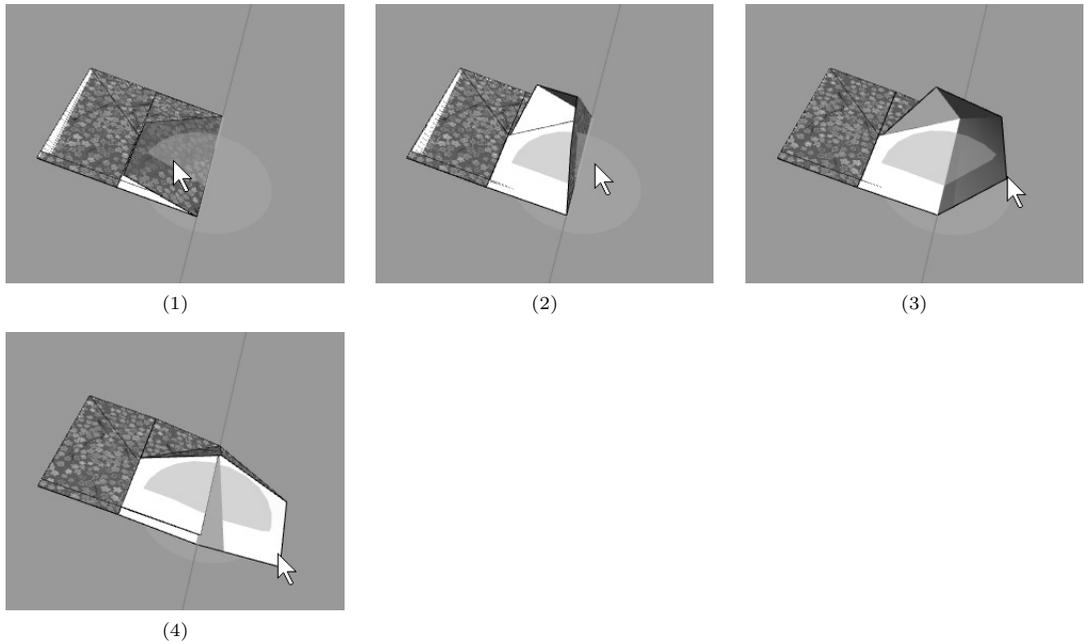


図 14 本プログラムによるモデリングの様子
Fig. 14 Appearances of modeling by my program.

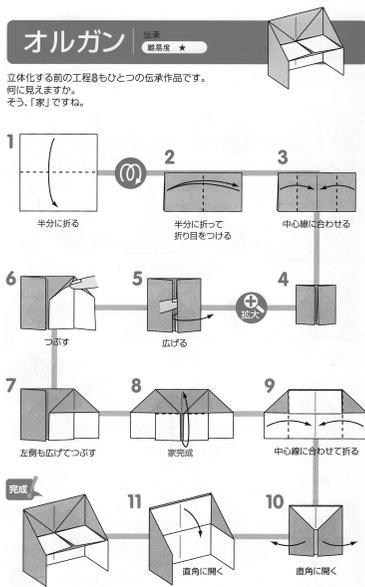


図 12 オルガンの折り図¹⁴⁾
Fig. 12 The Origami diagrams of Organ¹⁴⁾.

ている場面である．これは本来は 1 度の折り操作で作られるものであり，本システムを用いた場合には現実の折り操作と同じく 1 度の操作で形状を構築することができた．しかし Metasequoia を用いたモデリングの場合は中心付近の辺を外側へ平行移動した後，三角形の底辺の中点に相当する頂点を正しい場所へ移動

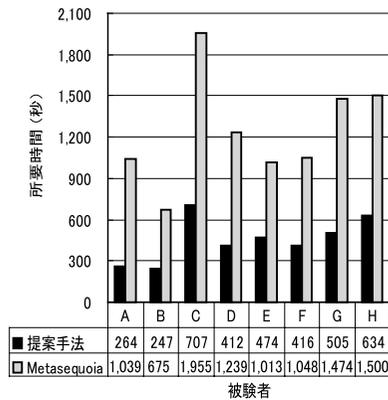


図 13 各被験者の所要時間
Fig. 13 Each testee's time required.

させるという 2 つのステップをふまなければならない，また操作の途中では大きく面が歪んでしまっている．

この折り操作を宮崎らの開発したアプリケーション「折り紙シミュレーション⁷⁾」で行った場合は図 16 のようになり，カドを内部に折り込んだあとに折り返すというように，同じく 2 つの手順をふまなければならない．またカドの折り込みという操作は実際にはほとんど用いられない動作であるとともに，変化の様子が少なく折り方を理解しにくいという問題点がある．なお，折り紙シミュレーションでは「被せ折り」などの折り畳み・折り返し・折り込みの組合せでは表現でき

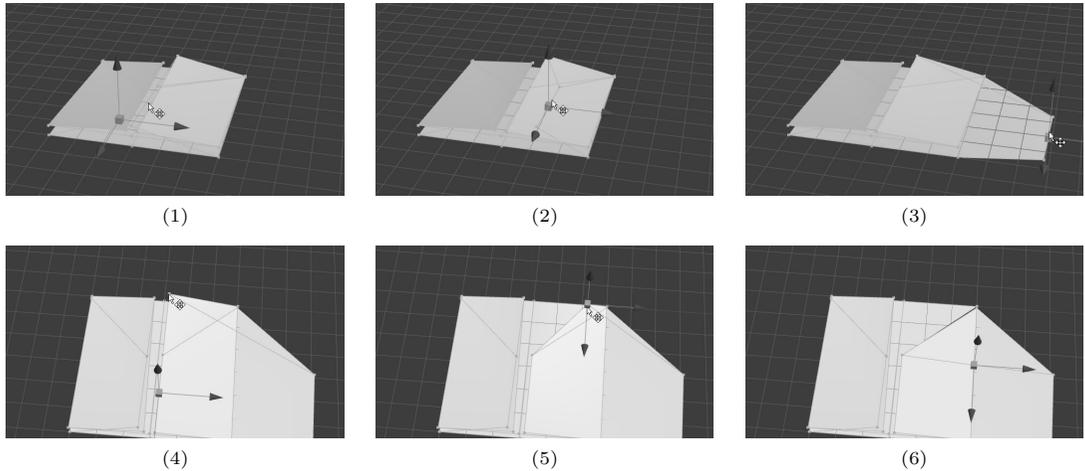


図 15 Metasequoia によるモデリングの様子
Fig. 15 Appearances of modeling by Metasequoia.

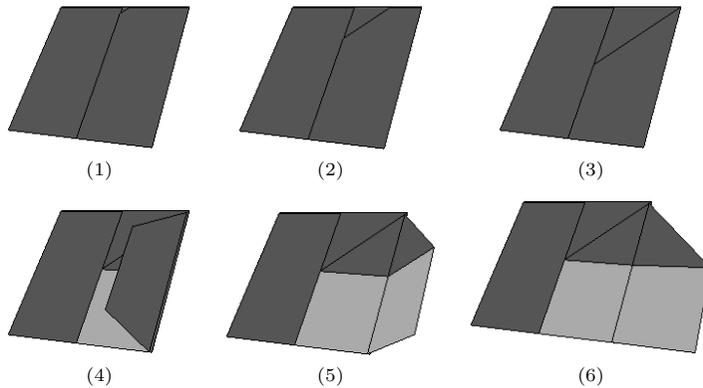


図 16 折り紙シミュレーションによる折り操作の様子
Fig. 16 Appearances of folding by Origami simulation.

ない折り方はできないが、本システムでは可能である (図 17)。

この実験の結果、被験者からは Metasequoia を用いたモデリングでは、「辺や点を正しい方向へ動かさない」と面の歪みが発生してしまうため、4 面図を用いてさまざまな角度から同時にしながら操作しなければならず大変だった、「面が複数重なった状態になると移動させたい面を識別して選択することが困難となり、思いどおりに形状を作れない」、「折るというよりは、設計しているという感じだった」などの感想を得られた。それに対して本システムを利用した場合は、「面の形状の保持を意識しないでよいため、直感的にモデリング操作を行うことができ、ほとんど手で折っているような感覚で操作できる」というような、より直感的に使うことができたという感想が多数得られた。

本システムを用いて作った他の形状を図 18 に示す。

5. 考察と今後の展望

本論文による提案手法を用いることでこれまで計算機上で表現することが難しかった紙の形状変化の実時間シミュレーションが可能となり、複雑な折り紙形状や折り畳み方を表現することができるようになったが、個々の面どうしの重なり合いや衝突を考慮していないため意図しない結果になることがある。たとえば図 18 の折鶴や鳳凰の背中付近など、ごく近い場所で面が多数重なり合っている形状の場合、面が交差してしまいレンダリング結果が不正になっている。また図 19 のように重なり合った面を同時に動かした場合、マウスで直接操作している面以外をその面に追従させて動かすことができない。これらはユーザが手動で形状を微調整することである程度解決することが可能であると思われる。しかし根本的な解決のためには、面どうし

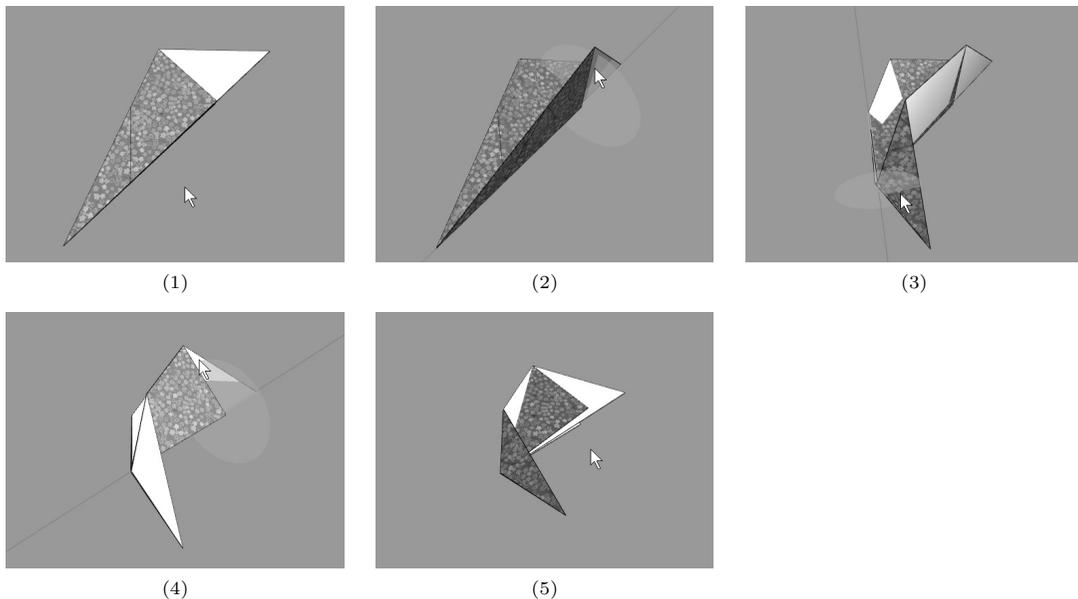


図 17 被せ折り

Fig.17 Outside reverse fold.

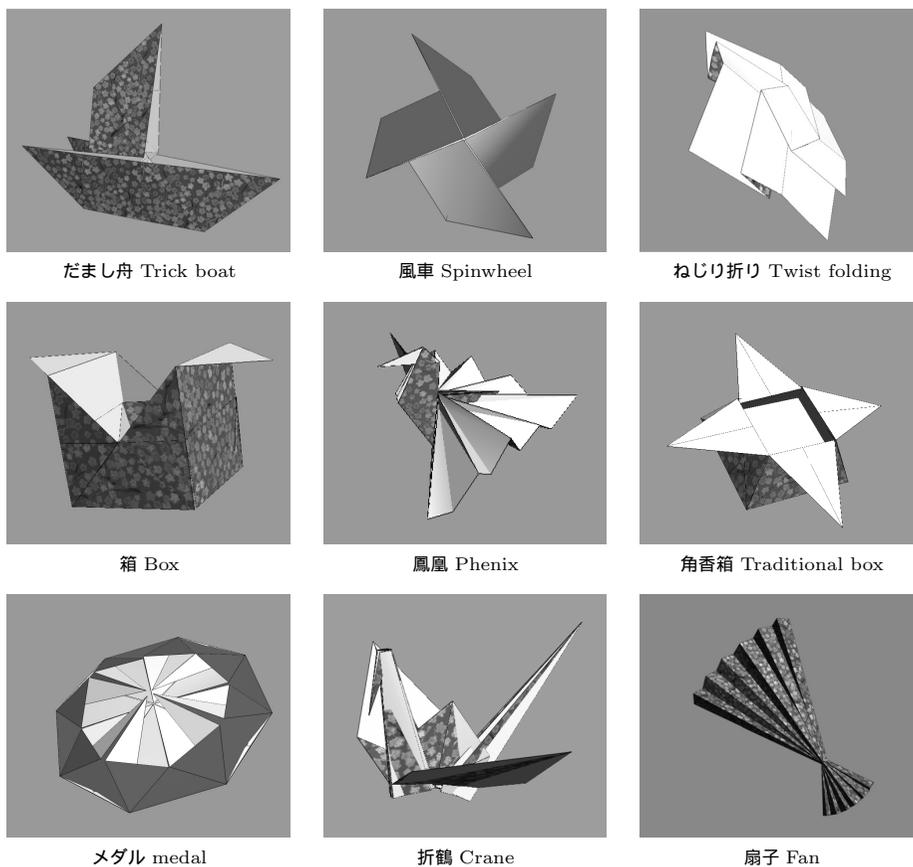


図 18 作例

Fig.18 Examples.

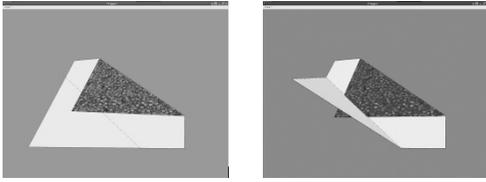


図 19 重なりを考慮して同時に動かすことができない

Fig. 19 Layered faces can not be moved at the same time.

の位置関係の変化を調べ、衝突していたら適切な位置へと移動させる処理を加える必要があるだろう。何重にも重なった面を同時に動かす場合においても高速に処理を行えるような手法について、現在模索中である。

本論文で提案する手法を用いて折り操作を効果的に分割することで、通常両手が必要となる折り紙の操作をマウスのみでも折ることができた。しかし紙を引っ張るような本質的に両手が必須の操作はそのようなアプローチでは解決できないため、仮想空間上に紙をピン止めする機能の追加などさらなる改良が必要であるといえる。また、本研究の中ではバネの力を面の形状の復元にしか用いていないが、その反発力を折りたたまれた面の展開などに利用することでさらに高度なモデリング操作が行えるようになる可能性がある。それらを実際の折り紙の持つシンプルさを損なわないように留意しつつ、アプリケーションの機能として実装することも今後の課題である。

また、本システムを用いることで任意視点から観察することが可能な三次元折り紙アニメーションを容易に得ることが可能となる。従来からの折り図に代わってこれを用いることで、より分かりやすく折り手順を伝達できるようになることが予測される。そのため、そのような三次元折り紙アニメーションを用いた折り手順伝達手法と、折り図を用いたものとの間で、どの程度理解度に差が生じるかなどを被験者を用いて実験を行いたい。

参 考 文 献

- 1) Cromvik, C.: Airbag Folding based on Origami Mathematics, *The 4th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education (4OSME)* (2006).
- 2) Goppert, K.: Adaptive Tragwerke-Wandelbare Dachkonstruktionen für Sportbauten, *Bautechnik*, Vol.82, No.3, pp.157–161 (2005).
- 3) 桃谷好英：おりがみ虫の世界，pp.72–73，誠文堂新光社 (2002).
- 4) 目黒俊幸：折り紙解体新書第 1 回，季刊「をる」，No.5, pp.92–95，双樹舎 (1994).
- 5) Lang, R.J.: *Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art*, AK Peters, Ltd. (2003).
- 6) 内田 忠，伊藤英則：折り紙過程の知識表現とその処理プログラムの作成，情報処理学会論文誌，Vol.32, No.12, pp.1566–1573 (1991).
- 7) Miyazaki, S., Yasuda, T., Yokoi, S. and Toriwaki, J.: An ORIGAMI Playing Simulator in the Virtual Space, *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol.7, No.1, pp.25–42 (1996).
- 8) Tachi, T.: Smooth Origami Animation by Crease Line Adjustment, *SIGGRAPH 2006 Posters* (2006).
- 9) 三谷 純，鈴木宏正：折り紙の構造把握のための形状構築と CG 表示，情報処理学会論文誌，Vol.46, No.1, pp.247–254 (2005).
- 10) Kato, J., Watanabe, T., Hase, H. and Nakayama, T.: Understanding Illustrations of Origami Drill Book, 情報処理学会論文誌，Vol.41, No.6, pp.1857–1873 (2000).
- 11) 三谷 純：二次元バーコードを用いた紙の折りたたみ構造の認識とモデル化，情報処理学会研究報告，2005-CVIM-150, pp.115–122 (2005).
- 12) Autodesk: Maya 8 Unlimited (2006).
- 13) 宮崎慎也，安田孝美，横井茂樹，鳥脇純一郎：仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現，電子情報通信学会論文誌，Vol.J79-A, No.11, pp.1919–1926 (1996).
- 14) 川崎敏和：博士の折り紙 夢 BOOK，p.208，朝日出版社 (2006).
- 15) Mizuno, O.: metaseq.net (2007).

(平成 19 年 3 月 29 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)



古田 陽介

1983 年生。2006 年名古屋市立大学芸術工学部視覚情報デザイン学科卒業。同年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入学。現在に至る。



木本 晴夫 (正会員)

1949年生。1973年大阪大学基礎工学部卒業。1975年同大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話公社(現NTT)入社。以来、情報検索、情報可視化、感性検

索、色彩印象分析、デザイン印象分析、画像解析の研究開発に従事。現在、名古屋市立大学大学院芸術工学研究科教授。博士(工学)。1998~2000年情報処理学会情報学基礎研究会主査。情報処理学会平成10年度山下記念研究賞受賞。電子情報通信学会、日本色彩学会、日本感性工学会、日本デザイン学会、画像電子学会各会員。



福井 幸男 (正会員)

1973年京都大学工学部精密機械工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。1980年東京大学大学院修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所入所。1993年生命工

学工業技術研究所主任研究官。1998年筑波大学教授電子・情報工学系、現在同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に勤務。形状処理、形状設計支援システム、力覚提示技術等の研究に従事。電子情報通信学会、日本バーチャルリアリティ学会、ヒューマンインタフェース学会、日本人間工学会、芸術科学会、ACM各会員。



三谷 純 (正会員)

1975年生。2004年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、独立行政法人理化学研究所基礎科学特別研究員、2005年筑波大学大学院システム情報工学研究科講師、現在に至

る。コンピュータグラフィックスおよび計算機を用いたペーパーラフトの設計支援に関する研究に従事。博士(工学)。科学技術振興機構さきがけ研究員。日本図学会、芸術科学会、画像電子学会各会員。
