

マルチタッチ操作による折り紙体験システム

田 中 建 伍[†] 川 上 武 志^{††}
竹 島 哲^{††} 笹 倉 万 里 子[†]

本稿では、マルチタッチ操作を用いることで現実折り紙を折る動作に近い操作で携帯機器上で折り紙の体験ができるシステムを提案する。計算機上で仮想的に折り紙を作成する研究はこれまでも多く行われているが、それらのほとんどが入力にマウスを用いていた。本システムでは、現実世界で折り紙を作成する時と同じ指を用いるマルチタッチ操作を用いることで、より実際に折り紙を折る操作に近いインタフェースの構築を目的とする。本稿では、実際に iPad 上に谷折りに対応したシステムを構築したことを報告し、今後解決すべき課題について述べる。

An origami playing system by multi-touch operation

KENGO TANAKA,[†] TAKESHI KAWAKAMI,^{††} SATOSHI TAKESHIMA^{††}
and MARIKO SASAKURA[†]

In this paper, we propose a system in which a user can play origami on a portable device with multi-touch operation. Most of existing origami systems on a computer use a mouse as the input device. However, users can hardly feel folding sense of origami by a mouse. We aim to make an interaction method with multi-touch operation which makes a user feel as playing origami in the real world. We report a system on iPad, in which we can make valley fold, and mention the problems that should be solved to develop a system which supports more complicated folds.

1. はじめに

折り紙とは、紙を折ってさまざまなものの形を構築する遊びであり、またそれに使う紙のことである。折り紙は古くからある日本の遊戯として知られているが、近年、さまざまな観点から研究の対象になっている。

折り紙に関して行われている研究には、例えば次のようなものがある。

- 数学的な観点から折り紙を研究するもの¹⁾²⁾³⁾
- 計算機で折り紙を実現するためのモデリングに関するもの⁴⁾⁵⁾⁶⁾
- 計算機で折り紙を操作する手法に関するもの⁷⁾⁸⁾
- 3次元の折るアルゴリズムの最適化に関するもの⁹⁾

本稿では、このうち、主に計算機で折り紙を操作する手法およびそれに付随する問題を取り扱う。

現実世界で折り紙を折る場合には、人は主に指を使うが、計算機上で折り紙を操作する場合には、一般に

指を使って折ることができない。そのため、主にマウスを使って折り紙を操作する手法について研究されている⁷⁾⁸⁾。しかし、マウスを入力として折り紙を操作する方法では、現実の折り紙を折るという感覚を得る事は難しい。

折り紙が古くから日本の遊戯として親しまれてきた理由は、折り紙に以下の点があったからであると考えられる。

- 指を使って折るという行為そのものが楽しいという点
- 自由に折ることができる点
- 紙飛行機や鶴といった様々な形が構築できる点
- 平らな折り紙を立体的に折ることができる点
- 完成した折り紙を使って遊ぶことができる点

そのため、折り紙を計算機上でシミュレーションする場合でも、自分で折り紙を自由に折っている感覚をもちながら折ることができることと、完成した折り紙を使って遊んだり見ることができることが重要であると考えられる。実際の折り紙を折るように計算機上でも折り紙を操作することができれば、計算機上で日本の遊戯としての折り紙の楽しさを感じることができると可能性

[†] 岡山大学大学院自然科学研究科

Graduation School of Natural Science and Technology

^{††} アイピーシステム株式会社

I.P.SYSTEM INC.

がある。

計算機上で実際の折り紙を実現するためには以下の問題がある。

- 画面上にあるため紙の感覚が無いこと
- 「折る操作」を実現する入力方法

折り紙を実際に折る時には、基本的に指を使って折り紙を折るため、折り紙に触れているという感覚を持ちながら折っている。計算機上で折り紙を操作するとそういった感覚を得ることができないというのが1つ目の問題点である。このような感覚を計算機上で感じるためには、折り紙を操作するためのインタフェースにハプティックデバイスのような力覚情報を得ることができるデバイスを使用することが考えられるが、本稿では扱わない。

今回の研究では、2つ目の問題に対応し、指で折り紙を操作する感覚に近い操作を実現するマルチタッチを入力とした折り紙体験システムを提案する。折り紙に触れている感覚を得ることはできないものの、マルチタッチ入力を用いて画面上の折り紙をタッチし操作することで、指で折り紙を折っているという感覚を得ることができるものを目指す。

第2節では、関連する研究について述べ、第3節では折り紙体験システムについて述べる。第4節で考察と今後の展望についてまとめる。

2. 関連研究

折り紙に関する研究は、これまでに多く行われている。例えば、折り紙の科学・数理・教育に関する国際会議¹⁾が1989年、1994年、2001年、2006年に開催されている。この会議では、数学者から折り紙愛好家までが参加し、様々な観点から折り紙に関する研究発表を行っている。

数学的な研究としては、Auckly ら²⁾が、代数学の視点から構築可能な折り紙について述べている。Roger³⁾はコンパスを使った代数幾何学の公理と折り紙の構成要素から得られる公理との関係を述べている。Kanade¹⁰⁾は折り紙は3平面の連結でできているものとし、折り紙の領域での定理について研究している。

折り紙の研究は実用的な分野にも生かされている。Christfer⁹⁾は折り紙の平面を折ることで3次元形状を作ることができるという性質とそのアルゴリズムを利用し、エアバッグを収納する方法の最適化を行っている。

計算機上で折り紙を扱う研究として、内田ら⁴⁾が折り紙の展開図を構成する幾何学的要素から出来上がり図を推論する一方法について提案している。ここでは

出来上がり図というのは、二次元平面の折り目の重ね合わせであると定義されている。

折り紙を計算機上で表現する時、現実の折り紙のような厚みをどのように表現するかという問題がある。厚みがないと、例えば折り紙が折り重なった時の形状が正しく表現できない場合がある。この厚みの問題の解決に関して、三谷ら⁵⁾が厚みを考えず平面の集合で表現された折り紙のデータを元にその構造を理解しやすいような表示を行う研究を行っている。三谷らは、

- 厚み方向への面の再配置
- 面と面の接続の表現
- 頂点変更によるずれの表現
- ノンフォントリアリスティックレンダリングの表示手法の利用

以上の手法を用いて、計算機上での折り紙の形状をCG表示して、構造を理解しやすい表示にしている。

計算機上での折り紙のモデル化の手法に関しても研究が行われている。Miyazaki ら⁷⁾の折り紙モデルは面の集合で折り紙の形状を表現し、対話的に折り紙を操作する手法とそれに伴って逐次変化する折り紙の形状のデータ更新の手法を提案している。

古田ら⁸⁾はマウスのみで直観的、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している。この研究では折り紙の形状をバネマスモデルというモデルで表現している。これは面を構成する全ての頂点間に網羅的にバネが張られているモデルを使用し、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移動することができる。

Radhika⁶⁾は局所的相互作用から折り紙の全体の形を柔軟に構築する手法とそれに基づく手法からOrigami Shape Language という言語を提案している。Radhika は生物学の観点から単体では単純で信頼性が低いとしても、単体が集まることにより最終的に強健なものが出来上がると考えており、これを局所的相互作用から折り紙の全体の形を柔軟に構築する手法に適用している。

このように折り紙に関して数学的な観点からの研究や計算機上での折り紙のモデリングの手法、折り紙の表示方法、操作方法などの研究が行われている。しかし、指で折り紙を折っているという感覚を得ようとすると、マウスを入力としたインタフェースでは難しい。本稿では、マウスを使った操作方法よりも折り紙を折る操作に近づけるため、指で直接タッチパネルをタッチするマルチタッチを入力とした折り紙操作を提案する。

3. 折り紙体験システムの開発

3.1 概 要

本節では、計算機上でより実際に折り紙を折る操作に近いインタフェースの構築を目的としたマルチタッチを用いた携帯機器上での折り紙体験システムについて述べる。折り紙を実際に折る時には、折り紙を指で触って折るが、計算機上に実現された折り紙を直接指で触って折ることはできない。しかし、指を使ったマルチタッチ操作を用いれば、従来のマウスの入力によって折り紙を折る操作より実際に折り紙を折る操作に近いインタフェースになると考えられる。

3.2 節では実際の折り紙の折り方について考察する。3.3 節では、折り紙体験システムでの折り紙を折る方法について述べ、3.4 節では、折り紙体験システムでの折り紙の描画について述べる。3.5 節では、折り紙体験システムの実行例を挙げる。

3.2 折り紙の操作

実際の折り紙を折る時の操作は、基本的に以下の2つの操作を同時、または順番に行うことで折り紙を折る。

- 折り紙の端を折りたい場所へ持っていく
- 折り目をつける

折り紙を最初の正方形の状態から折る時、折り紙の4つの辺のいずれかを含んだ部分を必ず折る。この時、折り紙の端の部分を折りたい場所まで持っていく折り目をつける。折り紙の折られていない最初の状態の4つの辺と折り紙を折ったときにつけた折り目をここでは「端」と呼ぶことにする。折り紙を折り進め、さらに折り紙を折る時、その状態では、折り紙の外側にある端と、折り重なっていて他の場所とくっついていない端の部分のいずれかが「折り紙を折る部分」に含まれる。この「端」と「折り紙を折る部分」を折りたい場所へ持っていくことを「折る部分の移動」とし、折り紙の折りたい場所へ持っていく部分と持っていない部分の境界線上に折り目を付けることを「折り目をつける操作」と呼ぶことにする。

本システムでは、折り目をつけ、折る部分を移動するという順番で折り紙を折ることができるようにしている。始めに折り手は折り目をつけ、折り目を境界としたどちら側の折り紙の端を折るかを選択する。すると、システムは選択した側の折り紙を折りたい場所へ持っていく。また、折り紙が折り重なっている時にどの端の部分を持っていくか選択することができる。

現実の折り紙を折る場合は、両手で折り紙を持って折る方法と机の上に折り紙を置いて折り紙を折る方法

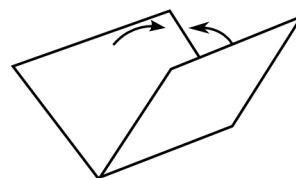


図 1 谷折り
Fig. 1 Valley fold

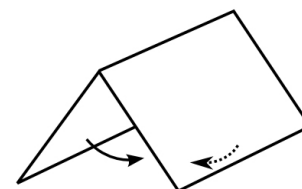


図 2 山折り
Fig. 2 Mountain fold

がある。両手で折り紙を持って折る場合は折り紙を折る操作と同時に折り紙の向きを変えることで折り紙を立体的に捉えながら折ることが可能になる。

両手でもって折り紙を折る状況を携帯機器の画面上で表現するためには以下の点を同時に行う必要があると考えられる。

- (1) 折り目をつける
- (2) 折る部分の移動
- (3) 視点の移動

この(1)と(2)の折り紙を折る操作と(3)の視点を変更する操作を同時に行うと折り紙体験システムの操作が複雑になるため、本システムでは机の上に折り紙を置いて折り紙を折る。机の上に折り紙を置いて折り紙を折る状態では、谷折り(図1)と呼ばれる、折り紙をユーザから見て手前に折る折り方をすることが多い。山折り図2と呼ばれるユーザから見て奥側に折る折り方は、机の上で折り紙を折る時には、折り紙の表と裏を逆にし、谷折りで折る。したがって折り紙体験システムでは全て谷折りで折り紙を折っていくこととする。

3.3 マルチタッチを入力とした操作方法

机の上で折り紙を操作する時に考えられる操作には以下の2点がある。

- 折り紙を折る操作
- 折り紙の表と裏を逆にする操作

ここで、折り紙を折るとは3.2節で、説明した折り紙の端を持っていくと折り目をつける操作の2つを意味している。机の上で折り紙を折る時には、折り紙は谷折りができれば良い。山折りをしたい場合は折り紙の表と裏を逆にし、谷折りをを行う。

折り紙体験システムでは、これら 2 つの操作を行うための折り紙を折る状態と折り紙の表裏を逆にする状態を持ち、その 2 つの状態をボタンによって切り替える。折り紙を折る状態では、折り目を設定して、折り目で分かれた部分のどちらかを折りたい位置に折ることができる。

折り紙を折る操作をする時には、以下の 2 つの操作を用いる。

- ピンチイン・ピンチアウト
- フリック

ピンチインは 2 つの指でマルチタッチし距離を縮める動作で、ピンチアウトは 2 つの指でマルチタッチし距離を広げる動作である。フリックは 1 本の指で画面をはらう動作のことである。ピンチアウト・ピンチイン操作で折り目を設定する操作を行い、フリック操作で折り紙の端を折りたい場所へ持っていく操作を行う。この操作を順番に繰り返していくことで、折り紙を様々な形に折っていくことができる。基本的な操作方法は以上である。

本システムではマルチタッチを入力としているが、指の大きさに個人差があり、マウスでカーソルを動かして入力する操作に比べるとマルチタッチによる操作は正確に細かい操作をすることが難しいという問題がある。この問題を解決するために、折り紙を折る時の操作は折り目をつける操作、折る部分の移動操作という順番で操作を行う。最初に折り目を設定することで、折り目を境界として折り紙を部分に分ける。次に折り目を境界として分けた部分のどちら側かをタッチしフリック操作を行うことで、タッチした部分の折り紙を折る。最初に折り目を設定し折り目で分けられたどちら側かをフリック操作で指定できるので、細かい操作をせずに済む。しかし、折り紙が折り重なり小さくなっていた時に正確な操作が必要となる場合がある。

折り紙を折っていると折り紙が折り重なり、折り目の設定した場所によっては、折り紙の折り方に複数の選択肢が発生する場合がある。折り紙の折り方に複数の選択肢が発生した場合にも、最初に折り目を設定しフリック操作時のタッチの場所によって折り紙の折る部分を選択することで折り手の意図通りの操作が行える。

例えば、図 3 の (a) のように、折り目を設定した時、折り紙の折り方には以下の 3 つが考えられる。

- 赤い部分のみを折る (図 3 の (b))
- 黄色の部分のみを折る (図 3 の (c))
- 赤い部分と黄色の部分両方を折る (図 3 の (d))

本システムでは、折り重なった図の赤い部分をフリッ

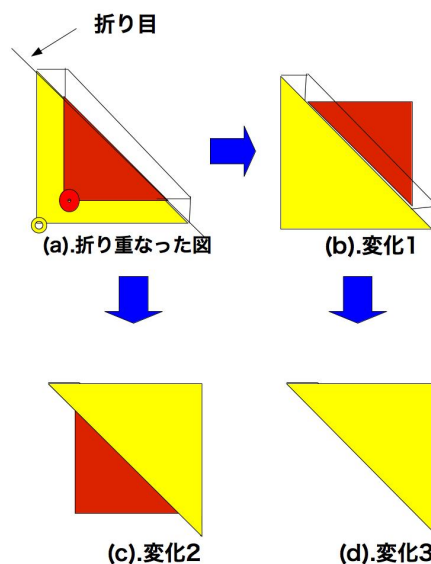


図 3 折る部分の選択

Fig. 3 The selected section to fold.

クすることで、図 3 の (b) のように赤い部分のみを折ることができる。(c) のように黄色い部分のみを折る場合、山折りをする状態であるので、反転のボタンを押し、折り紙の表と裏を逆にし、折り重なった図の黄色い部分をタッチし、フリックすることで折ることができる。赤い部分と黄色い部分を両方折る場合には 2 通りの方法があり、1 つ目は (b) のように赤い部分をフリックして動かし、次に黄色い部分をフリックして動かす方法と折り重なった図の黄色い部分をフリックする方法である。この 2 通りの方法で (d) のように赤い部分と黄色い部分を両方折ることができる。

3.4 折り紙の描画

iPad 上で表示している折り紙は OpenGL ES を使用して描画している。今回の折り紙体験システムでは折り紙を描画するための頂点配列として 40000 個の頂点の集合を保存し、折り紙の折る部分の頂点の座標を移動することで、折り紙を折る。これは本質的に Radhika⁶⁾ の方法と同じである。

このようなモデルを使った方法では折り紙が平面で表現されており折り紙の厚みが問題になる場合がある。三谷ら⁵⁾ は、計算機上での折り紙の構造を把握するため折り紙の厚みの問題をあつかっている。折り紙が折り重なっていくと、現実では、折り紙が重なった場所が厚くなったり、ずれたりするが、計算機上での本システムの描画モデルでは折り紙は厚みがゼロで平面として考えていると、こういった現実で起こることが発生しないという問題がある。

本システムに関しても折る時に厚みが無いため折り重ねると、どのように重なっているか分からない。そ

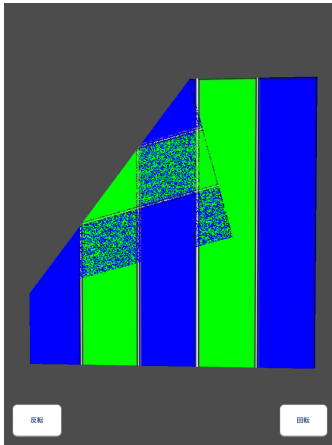


図 4 テクスチャが混ざった例 (厚みを考えていない場合)
Fig. 4 An example in which textures are mixed (without considering depth).

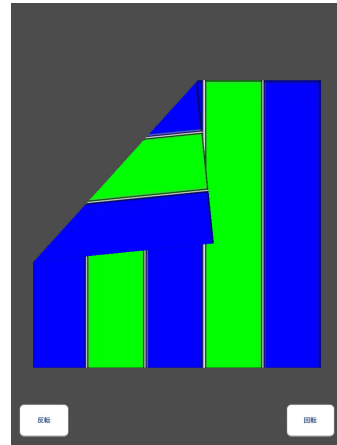


図 5 重なりが正しく表現できた例 (厚みを考えた場合)
Fig. 5 An overlapped paper (with considering depth).

のため以下のような問題が起こる。

- 折り紙が重なった状態ではフリックでどの部分をおろのか判断できない場合がある。
- 重なった部分のテクスチャが混ざり、折り紙がどのような形になっているのかが画面の様子を見るだけで分からない。

このような問題が発生するため、折り紙を手順に従って順番に折っていくということができなくなる場合がある。

この折り紙の厚みの問題を解決するために、折り紙を折るとき、折り目を軸にして折る部分と対称となる範囲の頂点の座標で最も画面の手前にある座標の値に一定の値を加えた値を折る範囲の座標に加える。折り紙の折った部分にこの値を加えることで、図 5 のように折った部分が画面手前に重なることになり、折り紙をどう折ったかが分かる。折り紙を折る過程でどのように折ったかが分かるため、折り紙を順番に折っていくことが可能になる。

3.5 実行例

本節では、作成した折り紙体験システムの実行例として、紙飛行機の作成過程を述べる。今回の折り紙体験システムでは、携帯機器は iPad (OS: iOS5 メモリ 256MB プロセッサ: Apple A4 プロセッサ System-on-a-chip 1GHz) である。また iPad での折り紙体験システムの開発では Objective-C で記述したほか、OpenGL ES を使用している。

本システムを実行すると iPad 上に正方形の折り紙が表示される。システムを実行した時の初期状態は折り紙を折る状態である。図 6 の 1 のように 2 本の指で画面をタッチし、ピンチイン・ピンチアウトを行うことで、折り目を設定する。折り目を設定した後、図

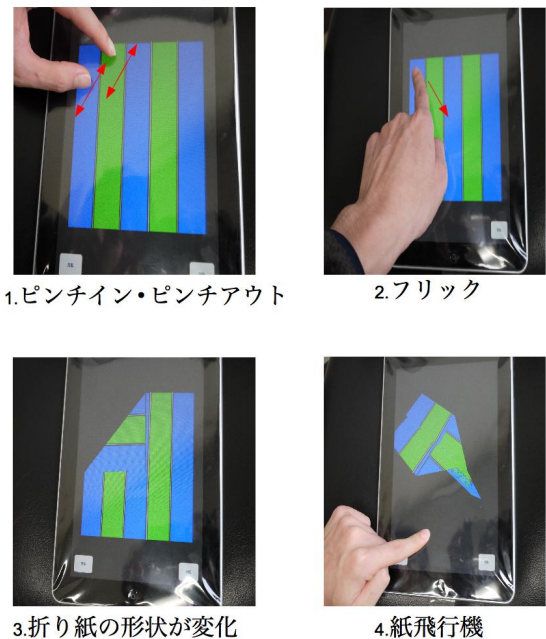


図 6 実行例 (紙飛行機)
Fig. 6 An example (paper airplane)

6 の 2 のように 1 本の指でフリックして折る部分を指定することで、図 6 の 3 のように折り紙を折ることができる。

ピンチイン・ピンチアウトとフリックの 2 つの操作を繰り返して、折り紙を折っていくと紙飛行機が作成できる。図 6 の 4 は作成した紙飛行機を角度を変えて見ているところである。

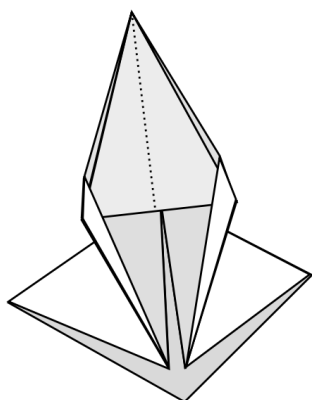


図 7 花弁折り

Fig. 7 Petal fold on one half of a preliminary fold.

4. おわりに

本研究では現実の折り紙を折る操作に近い動作で折り紙を体験できることを目的として、マルチタッチを入力とした折り紙体験システムを提案した。現状では、谷折りという基本的な折り方のみで折り紙を折ることができる。本システムを利用することで、様々な形状の折り紙（紙飛行機、ヨット、ふくろうなど）を折る体験ができる。

今後の課題としては、以下の点がある。

- 折り紙を折る操作方法
- 谷折り以外の折りの実現

今回の折り紙体験システムでは折り目をつける動作と折り紙の端を折りたい場所へ持っていく操作を順番に行う方法でのみ折る操作を行える。実際の折り紙では折る時に折り目をつける操作と折る部分の移動操作を一連の動作の中で行っている。実際の折り紙の操作に近づけるためには、同じように一連の動作として行えるようにする方がよいだろう。また、谷折り以外の花弁折り（図 7）や中割り折りといった複雑な折り方に対応することで、現状では折れない折り紙（鶴、兜など）の形状を構築することができるようになる。これらに今後取り組む予定である。

参 考 文 献

- 1) Thomas Hull 編集, 川崎 敏和和訳: “折り紙の数理と科学”, 森北出版株式会社, 2005.
- 2) David Auckly and John Cleveland: “Totally real origami and impossible paper folding”, The American Mathematical Monthly, vol.102, no.3, pp.215–226, 1995. 2004.
- 3) Roger C. Alperin: “A mathematical theory of origami constructions and numbers”, New

York Journal of Mathematics, vol.6, pp.119–133, 2000.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Radhika Nagpal: “Programmable self-assembly: constructing global shape using biologically-inspired local Interactions and origami mathematics”, Proceedings of the first international joint conference in Autonomous agents and multiagent systems:part1, pp.418–425, 2002.
- 7) Shin-ya Miyazaki, Takami Yasuda and Shigeki Yokoi, Jun-ichiro Toriwaki: “An ORIGAMI playing simulator in the virtual space”, The Journal of Visualization and Computer Animation, vol.7, no.1, pp.25–47, 1996.
- 8) 古田 陽介, 三谷 純, 福井幸男: “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”, 情報学会論文誌, vol.48, no.12, pp.3658–3669, 2007.
- 9) Christoffer Cromvik: “Numerical folding of airbags based on optimization and origami”, Chalmers University of Technology and Goteborg University, 2007.
- 10) Takeo Kanade: “A theory of origami world”, Artificial Intelligence, vol.13, no3, pp.279–311, 1980.