

論文名 Title	形状列挙に基づく幼児向け折り紙作品の 創作支援システム	A computer aided design system for simple origami pieces based on the enumeration of folded shapes
著者 Author(s)	鶴田直也、三谷純、金森由博、 福井幸男	Naoya Tsuruta, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori and Yukio Fukui
受理年月日 Date of acceptance	2011/12/28	
掲載 First publish	『折り紙の科学』（"Science of Origami"）2012/08/01 Vol. 2 No. 1 page 33-44	
備考 Note		

日本折紙学会
Japan Origami Academic Society
www.origami.jp

形状列挙に基づく幼児向け折り紙作品の創作支援システム

鶴田直也[†] 三谷純^{†‡} 金森由博[†] 福井幸男[†]

[†]筑波大学, [‡]JST/ERATO

305-8573,茨城県つくば市天王台 1-1-1

tsuruta@npal.cs.tsukuba.ac.jp

{mitani, kanamori, fukui}@cs.tsukuba.ac.jp

A computer aided design system for simple origami pieces

based on the enumeration of folded shapes

Naoya Tsuruta[†], Jun Mitani^{†‡}, Yoshihiro Kanamori[†], Yukio Fukui[†]

[†]University of Tsukuba, [‡]JST/ERATO

305-8573, Tennoudai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, JAPAN

要約 近年では折り紙の数理に関する研究の成果により、複雑な折り紙作品を創作するための設計手法が提案されている。しかし、幼児らを対象とした、少ない手順で簡単に折れる折り紙作品の創作については、これまでに十分な研究がされてこなかった。そこで本稿では、限られた回数（提案システムでは4回）以下の折り操作で作ることができる形状を列挙し、そこから目的の形を検索するアプローチで、単純な折り紙作品の創作を支援するシステムを提案する。

Abstract: Some methods for designing complex origami pieces have been developed based on studies of mathematics of origami in recent years. On the other hand, designing of simple origami pieces made with a small number of folds which are suitable for children have been left out of the scope of recent studies. In this paper, we propose a new system for designing new simple origami pieces, which can be folded by less than or equal to four times operations, based on the enumeration of folded shapes.

Keywords: Origami design, Computational origami, shape enumeration

1. はじめに

これまでに積み重ねられてきた折り紙の数理に関する研究の成果により、各種の設計技法が考案され、近年では複雑な作品を創作するための技術が発達してきている。伝承的な折り紙と一線を画す、精緻で複雑な折り紙作品はコンプレックス折り紙と呼ばれ、折り図の手順数が100を超えるものも珍しくない。動物や昆虫などの対象物を、リアルに再現したいという欲求が、折り紙設計の技術の発展を推進してきた。その一方で、わずか数回の折り操作で作られるシンプルな作品の設計に関する研究はほとんど行われておらず、例えば図1に示すような折り手に幼児を対象とした作品は、経験が豊富な折り紙作家の手によって、試行錯誤を伴う発見的なアプローチがとられているものと推察される。

そこで本稿では、4回以下の折り操作で作ることができる単純な折り紙作品を、新しく見

いやすためのシステムを提案する（4回という回数を選択した理由は第3章で述べる）。4回以下の折り方で表現できる形は限定されるように思われるが、それでも可能な折り方の組み合わせ数は膨大な数となる。その中に含まれるであろう、我々がまだ作品として見いだしていない形を発見し、新しい幼児向け作品の創作を支援することを目標とする。最初に思いつくアプローチは、従来の折り紙設計と同じ様に、意図した形を正方形から折りだすためには、どのようにすればよいかを幾何学的な観点から考察することであろう。しかし、これまでに考案された設計手法の中には、折り操作の種類や回数に制限を与えたものではなく、限られた折り回数で実現するための手法を確立することは、極めて難しい問題であることが予想される。

そのため、本稿で提案するシステムでは、使用する折り操作を限定した上で、指定した回数（4回）までの折り操作で作ることができる形をすべて列挙し、それをあらかじめデータベースに蓄えておくことを行う。ユーザが、動物の顔など、折り紙で表現したい形をシステムに入力すると、システムはそれに類似した形をデータベースから検索し、折り方を提示する。一見すると、力づくのアプローチであり、理論的でないように見えるかもしれないが、近年の計算機の性能の向上によって実現可能となった、目的達成のための現実的なアプローチである。取りうるパターンをすべて列挙することで、意図した形を最も適切に再現する折り方を見つけ出すことが可能となる。なお、このような実現方法に「創作」という言葉は適切でないかもしれないが、ユーザの視点に立てば、今までに知られていない折り方で、形を創り出す方法を模索するためのツールとして捉えることができるため、「創作支援」という言葉を使用することとした。さらに、折ってできる「形」だけでなく、幼児向けの折り紙作品に見られる「目や鼻の追加」の仕組みも組み込むことで、より実用的なシステムを構築した。提案システムを用いることで、幼児向けの新しい折り紙作品が数多く創り出されることが期待される。

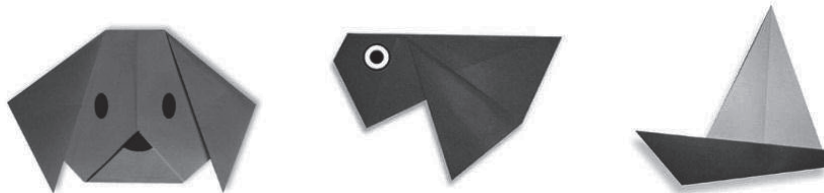


図1 文献[7]の幼児向けの折り紙作品例（左から「いぬのかお」、「きんぎょ」、「ヨット」）

2. 関連研究

鶴や兜のような伝承的な折り紙は、先人の試行錯誤により創り出されてきたものと考えられるが、このようなアプローチでは昆虫や恐竜のような複雑な形を創りだすことは困難である。そのため、折り紙の数理に基づく新しい創作技法が模索され、その結果として20世紀後半以降、複雑な折り紙を理論的に設計するための技術が生み出されてきた。1979年に発表された複雑でリアルな「悪魔」の作品[1]に見られる尻尾や角、指先に至る細部まで再現された形状は、それまでの「見立て」を中心とした折り紙とは一線を画すものであった。その後、突起を作るのに必要となる円形の領域を展開図上に配置する手法に基づく circle packing (circle/river packing, tree method と呼ばれる) などの設計アプローチが考案された。

これらは文献[5]に体系的にまとめられており、そのアルゴリズムを組み込んだ、設計支援ソフトウェア (Tree Maker) も公開されている[17]。このソフトウェアは、目的の形の構造を、線分のネットワーク (グラフ理論で用いられる「木構造」) として入力することで、その構造を折るための展開図を出力する。出力から得られるものは、基本構造だけであるため、細部の作り込みは人の手にゆだねられる。折り紙を格子状に区切り、その上に四角形領域を配置していく box pleating と呼ばれる設計技法も存在するが、その基本的な考え方は circle packing と同じである。これらの技術が依って立つ数学的な背景は、「折り」に関する約 400 もの参考文献を網羅した Demaine と O'Rourke による大著[8]にまとめられている。特に近年では、計算機を活用した折り紙の研究も増え、伝承的な折り紙とは異なる幾何学的な造形を持つ作品も登場するようになってきている。以降で、計算機を用いた折り紙研究の例をいくつか紹介する。

Bateman は、折り紙テセレーション (特定のパターンを敷き詰めて平坦に折り畳むもの) の展開図を自動生成するソフトウェア Tess[16]を作成した。Tachi は、CG の世界で一般的に用いられるメッシュモデルで表現される立体的な形を、1 枚の紙で折るための展開図を自動生成する手法を提案した[12]。これは、表面に現れない不要な部分を立体の内側に襞として折り込むことで実現している。一方で Mitani は、この襞を外側に折りだすことで、軸対称な立体形状をした折り紙を簡単なアルゴリズムで設計できることを示した[10]。また、平面曲線での折りを含む形状を対話的な操作で設計する手法も提案している[15]。既存の折り紙作品の形を計算機の中にモデル化するためのインタフェースに関する研究には、マウス操作に基づく手法[3, 9]、および 2 次元バーコードを用いた写真画像からの復元手法[11]などがある。本稿で提案する手法は、「目的とする形の輪郭」を入力に用いるが、このように形から折り方を導出するアプローチは、すでに Shimanuki らによって試みられている[6]。Shimanuki らは、イラストからスケルトン (骨格構造) を抽出し、その構造を折りだすための展開図を生成する手法を提案した。すでに挙げた circle packing の手法に近く、目的の構造は得られるが、その最終的な形を決めるのは折り手にゆだねられているため、やはりこの手法も、図 1 に示すような幼児向けの折り紙を創作するために用いることはできない。また任意の多角形状を覆うように細長い帯状の紙を折りたたむ研究[4]もあるが、こちらは正方形の紙には適用できない。

このように、折り紙に関する研究の発展には目覚ましいものがあるが、本研究で取り上げる、幼児を対象とした簡易な折紙作品の創作手法については注目されていない。これまでに紹介した研究のほとんどが、制作の難しさに大きく影響する「折り回数」に着目していないためである。簡単な折り操作のみを用いて作品を創作する形式としては、Smith が提唱するピュアランド折り紙[18]があるが、これも折り回数は限定されておらず、また設計アプローチについての言及はない。少ない折り回数で形を創りだすことは、折り紙の裾野を広げる上で大切なテーマであり、それをどのように実現するかは未解決な問題である。

3. 対象とする折り紙

本稿では折り回数の少ない幼児向けの折り紙作品を対象とするが、それらの作品に求められる特徴を知るために、簡単に作れる作品を紹介した書籍[7]に掲載されている作品 64 点を調査した。その結果、それらの作品は平均して約 8 回の折り操作で作ることができ、

最も折り回数の少ない作品は3回の折りだけでできていた(図1右の「ヨット」)。折り回数が多い作品でも、その手順には作品に丸みをつけるための「カドを少しだけ折る」といった操作が含まれることが多いため、作品の概形はより早い段階で決定される。以上より、4回の折り操作でも十分に作品の表現が可能であると考えられる。本研究では、冒頭で述べたように、可能な折り操作をすべて列挙するというアプローチを取るが、そのバリエーションの数は、折り回数に応じて爆発的に増加するため、現代の計算機での実現可能性という観点からも、対象とする折り紙の折り回数は少なければ少ないほどよい。詳細は第4章で述べるが、4回までの折り操作に限定すれば、すべて列挙するというアプローチが、現在の計算機で十分対応可能であった。幼児にとっても、少ない折り回数で形が作れることが好ましいと考えられる。以上のことを踏まえ、本研究では「4回以下の折り操作で作れる形」を対象とした。

本研究では折る回数だけでなく、使用する折り操作も限定する。紙を折る操作には「カドAをカドBに重ね合わせるようにして折る」というように参照点が存在する折り方と、「このくらいを目途にして適当に折る」という、参照点の無い曖昧な折り操作(折り紙の用語では「ぐらい折り」と呼ばれる)が存在するが、後者を含めると1回の折り操作にも無限のバリエーションが存在することになる。そのため、本システムでは参照要素(点と辺、辺は直線として扱う)を用いる次の3種類の折り操作だけを対象とする。

- ・ 点と点を通る直線で折る
- ・ 点と点を重ねるように折る
- ・ 直線と直線を重ねるように折る

参照要素の存在する折り操作は、過去の研究から、全部で8通り存在することが示されている[13]。今回挙げた3通りの折り操作も、これらの操作の中に含まれる。本稿では上記の操作を採用したが、これは「2つの点 P_1 , P_2 と2直線 L_1 , L_2 が与えられたとき、 P_1 を L_1 上に重ね、かつ P_2 を L_2 上に重ねる折り方」のような一般的に用いられない折り方を除外し、簡単な操作のみに限定するという目的がある。また、1回の折り操作で複数の折り線を同時に折る「しずめ折り」「かぶせ折り」「中割折り」などの技法も存在するが、これも同様の理由から今回の対象からは外した。

書籍[7]の作品を見ると、幼児が楽しめるよう、作品のモチーフは動物であることが多く、最後に顔を描くものが多かった。細部まで作りこむのではなく、簡単に作れることを重視した結果と思われる。特に、完成後に目を描く作品が多く、調査したものの半数以上がこれに該当した。このことを考慮し、本システムでは、作りたい形を入力するときに、目や鼻などの顔のパーツの位置も指定できるようにした。

4. 提案システム

提案システムの概要を図2に示す。上側は計算機があらかじめ行う処理を、下側はユーザが入力を与えた後の処理を示している。本稿で提案するシステムの流れは次のとおりである。

- (1) 4回以下の折り操作で得られる折り紙作品をすべて列挙しデータベースに格納する。
- (2) ユーザが目的とする多角形を入力する。また、紙の表裏の色の違いを考慮した、2色の多角形の集合を入力することも可能である。類似形状の判定には用いられないが、

オプションで目および鼻などのパーツも配置可能である。

- (3) 入力された多角形に形が類似した折り紙作品を検索し、類似度順に複数の検索結果をユーザに提示する。入力に目や鼻のパーツが配置されている場合は、同じパーツを配置した結果を示す。
- (4) ユーザが選択した折り紙作品の折り手順を提示する。

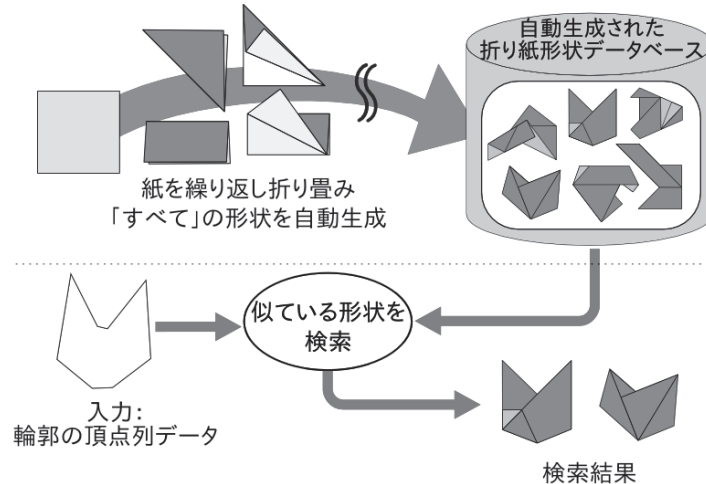


図2 システム概要

4.1. 折り紙形状データベースの自動生成

紙を折りたたんだ後の形を得るために、まず、折る場所を指定するための折り線の位置を決定する。ある状態における可能性のあるすべての折り線の位置は、第3章で述べた3つの折り紙公理を、すべての参照要素の組み合わせに適用することで求めることができる。具体的には、2つの参照点を結ぶ線分、2つの参照点の垂直二等分線、および2つの辺の成す角の二等分線が候補となる。

続いて、このようにして求めた折り線の位置で紙を折る。提案システムでは、1つの折り線に対して次の3通りの折り方があるものとした。

- ・ 谷折り
- ・ 山折り
- ・ 折ってひらく（以降の手順で折るときに参照できる点や線をつける操作、これも「1回」の折り操作とする）

紙が複数枚重なっている部分では、谷折りの場合は一番上にある面から1枚ずつ順番に折り畳み、すべてを異なる折り紙作品として扱う。これは先行研究として行った折り図作成支援ツールの開発[14]で、折り手順の予測の際に用いたアルゴリズムと同じであり、紙が内側に折り込まれるケースが除外されるため、紙が交叉するような形状が発生しない。山折りの場合は逆に、一番下にある面から順に折り畳む。「折り線をつけて戻す」操作は、すべての面に一度に折り線をつける。これら3通りの折り操作により、重なっている面の数を n とすると、1つの折り線から最大で $2n+1$ 個の形状が生成される（図3）。

ここまでの処理で折り紙の形状を網羅的に生成したのち、重複するものを除外してデータベースに登録する。ここでは、ある形に対して各面の共通重心から各頂点までの距離の総和（図4）が等しいものを、「回転および反転して一致するもの」と判断して除外した。

この方法で除外すると、輪郭は同じで面の重なり順だけが異なるものも除外されてしまうため、以降の手順において生成される形の候補が少なくなり、その結果として後述する紙の表裏の色の違いを利用した検索で適切なものが見つからなくなる可能性がある。しかし、この問題を解決するためには、紙を一旦開いて、展開図から面の重なり順が異なるパターンをすべて数え上げることが必要となる。異なる手順で同じ展開図が得られる可能性もあるため、それらの重複判定を含めると、データベースに格納される形の一意性を維持するのは、難しい問題と言える。今回は折った後に現れる輪郭の形に主眼を置いたためこの方法を採用したが、今後検討すべき点と言える。

なお、新しい形を格納する際には1手前の形が格納されている場所の参照を保持するようにした。これを順に辿ることで、後から折り手順を知ることが可能である。

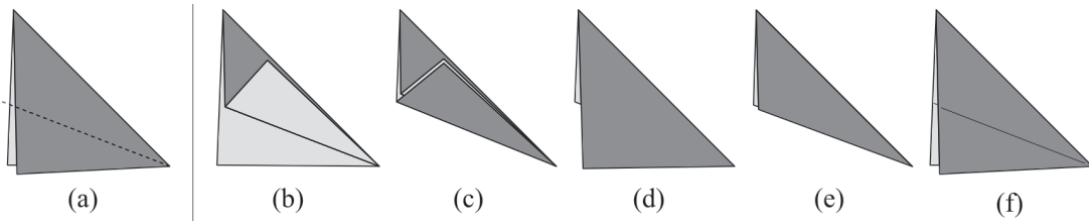


図3 1つの折り線から得られる形状。(a)では2枚の紙が重なっており、谷折りで(b),(c)、山折りで(d),(e)、折ってひらく操作で(f)が得られる

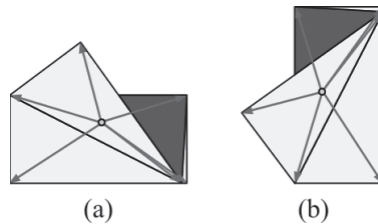


図4 同一形状であるか否かの判定。(b)は(a)を90度回転させたものであり、どちらも矢印の長さの総和が等しい。

4.2. ユーザ入力

図5にシステムの実行画面を示す。図5左は入力画面であり、ユーザは輪郭を表す多角形をマウスクリックにより入力する。これは各頂点を順番にクリックしていくことで行う。また、オプションで色の付く多角形領域を追加できる。これにより、折り紙の色のついた面が現れる部分を指定できる。さらに追加で、顔のパーツを配置できる。ツールバーにある目や鼻のボタンをクリックし、選んだパーツの位置をカーソルで指定し、マウスホイールによって大きさを調整できる。ここで配置したパーツは検索結果に重ねて描画される。顔のパーツはシステムの起動時に画像ファイルから読み込まれるようになっているため、他の画像を用意すれば新しいパーツとして追加することが可能である。

4.3. 類似形状の検索

形状の類似判定にはHuMoment[2]と呼ばれる形の特徴を示す指標を用いる。この指標を用いた理由は、頂点と数式で表されたベクタ画像に対して適用可能であり、折り紙形状データに適しているということと、画像の拡大縮小・平行移動・回転に対して不変という性

質を持つためである。この指標は画像処理で用いられる OpenCV の `cvMatchShapes` 関数にも実装されており、本システムの実装にもこれを参考とした。具体的には、入力した輪郭形状と折り紙形状からそれぞれ `HuMoment` を算出し、それらの値の差分を類似形状の判定に用いている。なお、折り紙形状データベースを生成する際にあらかじめ `HuMoment` もデータベースに格納しておくことで、計算時間の短縮を図っている。入力された多角形とデータベース内の全折り紙データを比較したのち、最終的に上位20個を出力するものとした。

4.4. 検索結果の提示

検索を実行した後は、その結果の上位 20 個が図 5 中央のように表示される。ここで提示された結果画像から 1 つを選択してクリックすると、その折り紙形状を折るための手順が別ウィンドウで表示される (図 5 右)。

検索前に目や鼻を配置した場合は、入力した多角形の重心から各パーツまでの距離を元に、検索結果にも同じパーツを重ねて描画する。重心からパーツまでの距離とパーツの大きさは、外接四角形で比べたときの比率を元に拡大または縮小され、結果画像に合うように表示される (図 6)。さらに、入力形状と折り紙形状の向きを揃えるために、後者を回転させて表示する。回転角度は、前述の `HuMoment` の計算時に算出できるが、 $-\pi/4 \leq \theta \leq \pi/4$ の範囲でしか得ることができない[2]。そのため、 $\pi/4$ ずつ回転させながら面積の排他的論理和を計算し、面積の差分が最も小さい向きを最も一致している向きとして回転させている。

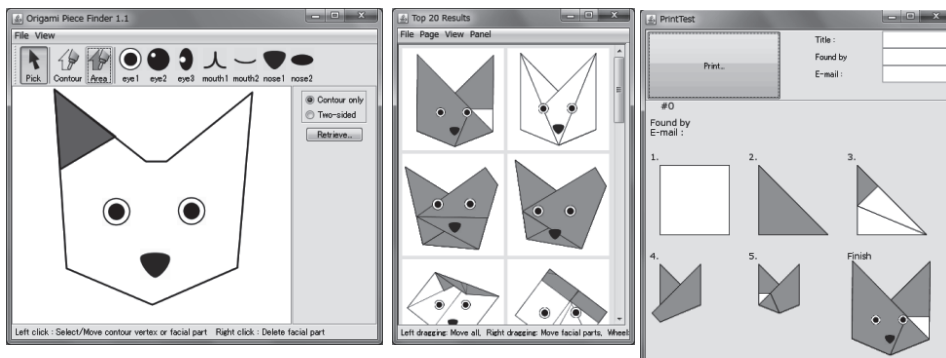


図 5 システム実行画面 (左: 入力ウィンドウ, 中: 結果表示ウィンドウ, 右: 折り手順表示ウィンドウ)

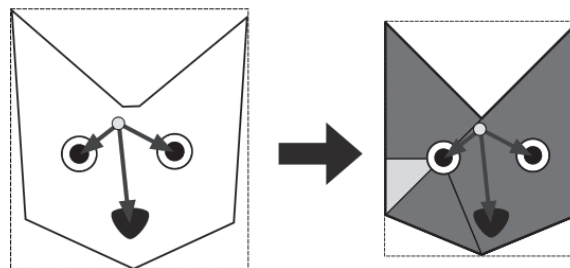


図 6 パーツの位置の決定

5. 結果と考察

提案システムで構築したデータベースの詳細と、入力としていくつかの輪郭多角形を与えたときの出力結果を示す。さらに、目や鼻などの顔のパーツの表示について考察する。

なお、システムの実装には Java と SQLite を用いて、Core i5 2.67GHz, 4GB RAM を搭載した PC 上で動作させた。

5.1. データベースの構築

折り紙形状を保持するデータベースの要素数とデータサイズを表 1 に示す。今回は 4 回までの折り操作としたため、4 回目の折り操作では「折ってひらく操作」によるデータを含めなかった。表 1 からは、折り回数が増えるに従ってデータ数が指数関数的に増加していることがわかる。なお、実際に生成された形状の一部を付録に記載した。

表 1 折り回数とデータ数およびデータサイズ

折り回数	データ数	ファイルサイズ	構築時間
1	4	2 (KB)	47 (ms)
2	37	15 (KB)	423 (ms)
3	1,507	706 (KB)	1421 (ms)
4	136,284	99.2 (MB)	122.7 (s)

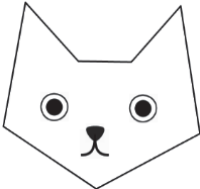
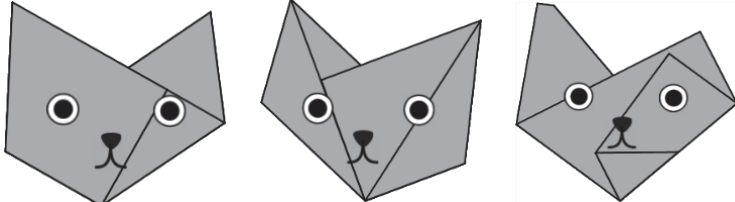
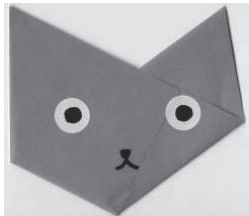
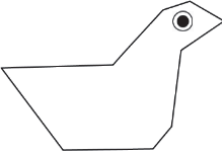
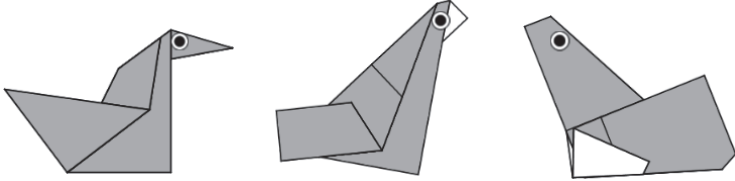

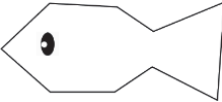
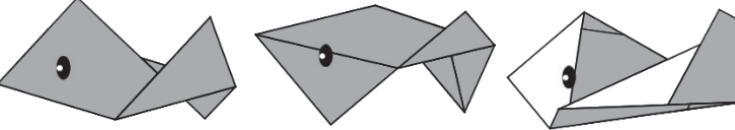

入力	出力結果	実際に折った作品
 <p>猫の顔</p>		
 <p>鳥</p>		
 <p>魚</p>		

図 7 入力形状と検索結果、および実際に折った作品

5.2. 検索結果

例題として 3 つの多角形を入力として検索を行った。その結果および実際に折った作品を図 7 に示す。結果に示した折り紙形状は、各入力に対して得られた上位 20 個のうち、筆者らがより似ていると判断した 3 つである。図 7 の結果からは入力に似た折り紙作品が得られていると言えよう。入力形状と合わないような折り紙形状が出力される場合もあるが、最終的な判断はユーザが実際に見て行うため、ある程度類似した形状が抽出できれば十分

だと思われる。上位 20 個程度まで絞り込めれば、人の目で容易に判断することができた。ただし、4 回という折り操作ではカドが多い形状を折り出すことが難しく、例えば「星型」などの入力に対しては似た形状は発見できなかった。

検索に要した時間は約 20 秒であった。検索時間の内訳は、輪郭線のみの場合、折り紙データとの比較に 18 秒、その上位 20 個に対して向きを合わせるための計算に 2 秒かかっている。検索を高速化する手法としては検索の並列化や、似た形状をあらかじめグループ化しておきデータベースを階層的な構造にすることが考えられる。

5.2.1. 紙の表裏を考慮した検索

図 8 には、紙の表が現れる部分を指定した入力に対して、輪郭だけで検索した場合と表裏を考慮して検索した場合で、最も似ていると判断した出力結果を示した。結果としては、共通して出力される形状はわずかで、異なる形状が多く出力された。図 8 に示した(b)は表裏を考慮した検索結果の上位 20 個には含まれず、また、逆に(c)は輪郭のみの出力結果に含まれなかった。図 7 に示した例でも、一部の色を指定することで違った結果が得られると思われる。

表裏を考慮した検索の精度をさらに高めるためには、次の 3 つの方法が考えられる。

- ・ 折り紙を裏返した場合も比較する
- ・ 重複の削減手法を改良する
- ・ 他の折り方を実装して候補を増やす

折り紙形状の中には、表から見た場合と裏から見た場合で、色の出ている部分が違う形状がある。そのため、反転した形状も比較すればそれだけで違う結果を得られる可能性がある。特に、折り紙においてよく用いられる「中割り折り」を採用することは、表裏を考慮した検索に非常に効果的であると考えられる。

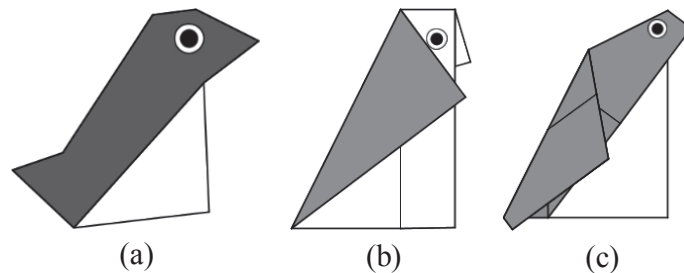


図 8 紙の表裏を考慮した検索例。(a)入力 (b)輪郭のみを用いた検索結果 (c)表裏を考慮した検索結果

5.2.2. 顔のパーツの表示について

図 9 には目のある場合とない場合の画像を示した。目があることで、動物としての認識のし易さが大きく向上する。本研究で取り上げたような簡単な作品では、回転させるだけで違う作品に見えることや、何に見えるかが人によって異なる場合が多い。顔のパーツの表示はそういった曖昧さを解消するための重要な要素であると考えられる。今回は顔のパーツのみを指定する機能を実装したが、顔だけでなく、例えば「くるま」や「いえ」などの作品であれば窓を描く場合もある。そのため、顔のパーツの位置を指定するだけでなく

汎用性の高いペイント機能があれば、検索結果での見やすさをより向上させることが可能である。

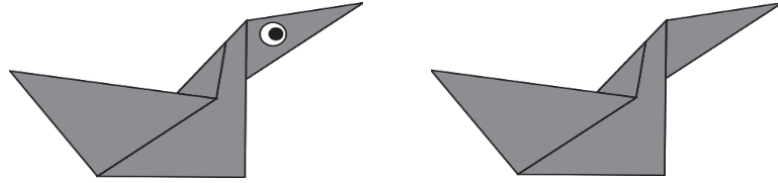


図9 目の有無による認識の違い

6. 制限と展望

提案システムでは折り紙形状のデータベースを構築する際に、折り操作の回数(4回まで)と折り方(折り紙の公理に基づく3通りの折り)、折り技法(山折りと谷折り、折り線をつける操作)に制限を設けた。提案手法では、データベースに存在する形状からユーザ入力に似たものを検索するため、データベースが大きければ大きいほど、より適切な形状を検索できる可能性が高くなる。上に挙げた制限を外すこと自体は難しくなく、そうすれば膨大な数の形状を生成することができる。ただし、それに伴ってデータベースのサイズが膨らみ、検索時間が長くなることが問題である。結果の良さと検索に要する時間はトレードオフの関係にあり、対象とする形状の制限と検索の効率化については今後の課題である。

折り回数と生成される形状数は指数関数的に増加するため、折り回数を1回増やすだけで場合の数は大幅に増える。4回折りのデータに、折り線をつける操作を加えたときのデータは約22万個あり、5回折った場合は、約5,400万個にまで増加した(厳密にn回折った場合の数を見積もるのは難しい問題で、数の推定方法は未解決問題である)。個々の形状は複雑になるため、データベースのサイズは数十ギガバイトのオーダーになると予想される。

7. まとめ

本研究は、幼児用の折り紙に着目し、ユーザが入力した形状を折り紙で表現する手法を提案した。提案手法では、折り紙のデータベースを自動で構築し、構築されたデータベースから入力に似た形状を検索する。既存の折り紙設計アプローチと異なり、できるだけ少ない折り回数で表現することを目的としているので、幼児でも簡単に折ることができる作品が得られるという特徴がある。また、作品の最終形を生成しているため、折り図が得られることや紙の表裏を考慮できることも利点の一つである。

しかし、折り回数を増やすと扱うべき場合の数が爆発的に増えるため、これよりも難易度の高い(折り回数の多い)折り紙作品を対象とすることが難しいといった問題もある。第6章で述べたように、同じ折り回数であっても、形状のデータを増やすことはより良い結果を得ることにつながるが、検索時間とのトレードオフ問題があるため、これに対処することが今後の課題である。

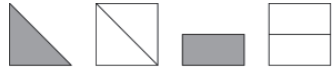
実験結果では、顔のパーツを描画することによる作品認識の向上についても触れた。幼児の折り紙において目や鼻などの付加情報が持つ意味は大きく、本研究では、このような点に着目したところに新規性があると考えている。認知科学の分野に含まれるが、これらのパーツの有無が具体的に対象物の認知にどの程度の影響を及ぼすのかも興味深いテーマである。

参考文献

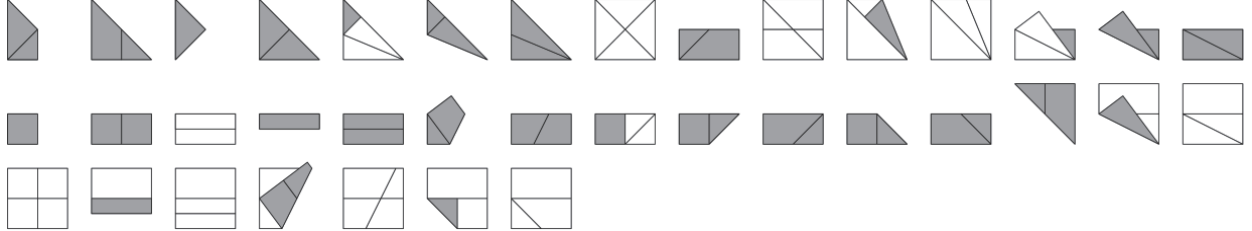
- [1] 前川 淳、笠原邦彦：ビバ!おりがみ、サンリオ、〔新装版〕 edition (1989).
- [2] Liao, S. X., Image analysis by moments, Ph.D. Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, (1993).
- [3] Miyazaki, S., Yasuda, T., Yokoi, S. and Toriwaki, J.: An Origami Playing Simulator in the Virtual Space, Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 7, No. 1, pp. 25–42 (1996).
- [4] Demaine, E.D., Demaine, M.L., and Mitchell, J.S.B. Folding Flat Silhouettes and Wrapping Polyhedral Packages: New Results in Computational Origami. In Proceedings of Symposium on Computational Geometry, pp.105-114 (1999).
- [5] Lang, R.J.: Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art, A K Peters Ltd, illustrated edition (2003).
- [6] Shimanuki, H., Kato, J. and Watanabe, T.: Constituting Origami Models from Sketches, Pattern Recognition, International Conference on, Vol.1, pp.628–631 (2004).
- [7] 新宮文明：おりがみしようよ! - めだまシールつき(実用 BEST BOOKS)、日本文芸社 (2005).
- [8] Demaine, E.D. and O'Rourke, J.: Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra, Cambridge University Press, reprint edition (2008).
- [9] Furuta, Y., Mitani, J., Fukui, Y.: "Modeling and animation of 3D Origami using spring-mass simulation", NICOGRAPH International 2008, CD-ROM, Pattaya Thailand, (2008).
- [10] Mitani, J.: A Design Method for 3D Origami Based on Rotational Sweep, Computer-Aided Design and Applications, Vol.6, No.1, pp.69–79 (2009).
- [11] Mitani, J.: Recognition, modeling and rendering method for Origami using 2D bar codes, In Origami 4, pp.251–258 (2009).
- [12] Tachi, T.: Origamizing Polyhedral Surfaces, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 16, No. 2, pp. 298–311 (2010).
- [13] Kawasaki, T. "A Note on Operations of Spherical Origami Construction" In Origami 5, pp.543–552 (2011).
- [14] Tsuruta, N., Mitani, J., Kanamori, Y., Fukui, Y. "A CAD System for Diagramming Origami with Prediction of Folding Processes" In Origami 5, pp.335–345 (2011).
- [15] Mitani, J., Igarashi, T., "Interactive Design of Planar Curved Folding by Reflection", In Proc. of Pacific Conference on Computer Graphics and Applications - Short Papers, pp.77-81, (2011).
- [16] Bateman, A.: Tess: origami tessellation software, <http://www.papermosaics.co.uk/software.html>.
- [17] Lang, R.J.: TreeMaker, <http://www.langorigami.com/science/treemaker/treemaker5.php4>.
- [18] Smith, J.: Pureland, <http://homepage.ntlworld.com/peterjohn.rootham-smith/pureland.htm>.

付録：自動生成された折り紙形状

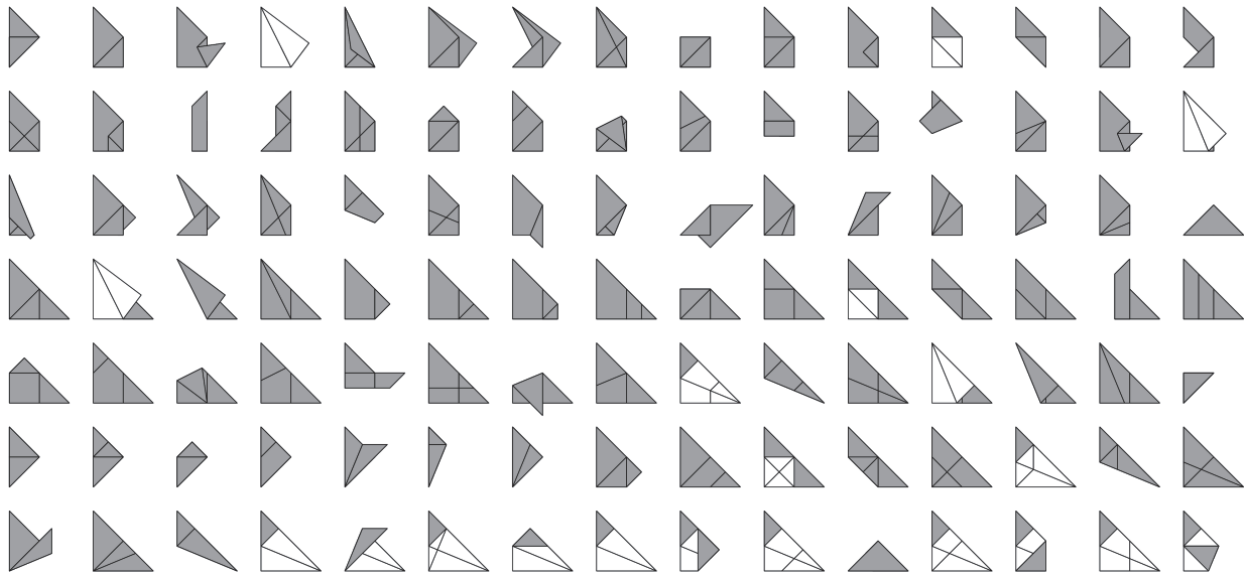
1回折り（全4通り）



2回折り（全37通り）



3回折り（1,507通り中の105例）



4回折り（136,284通り中の120例）

