

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

三 谷 純†

本稿では、折りたたまれた紙を撮影したデジタル画像から、その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する。提案する手法では、裏と表の両面に複数の2次元バーコードが格子状に印刷された紙を用い、撮影された画像に含まれるバーコードの位置関係から紙の折りたたみ構造を推定する。一般に2次元バーコードは文字列情報や固有の識別番号などを格納し「それが何であるか」を示すために用いられるが、本手法ではこれを紙の上に分散配置し、配置された位置に関する情報を格納することで、「紙がどのように折りたたまれているか」を認識することに応用している点に特徴がある。具体的には画像に含まれるバーコードの位置関係から折り線の位置と、どのような折り操作が行われたかを推定し、計算機内のモデルの更新を行う。本手法をPC上へ実装し、実際に折りたたまれた紙を撮影した画像から、その構造を認識して計算機内にモデル化できることを確かめた。

Recognition and Modeling of Paper Folding Configuration Using 2D Bar Code

JUN MITANI†

This paper proposes a method for recognizing and modeling paper folds from digital photographic images of the paper. 2D bar codes are printed in grid form on both sides of the paper. The folding configuration is derived from the positional relationships of the bar codes in the photographs. Although bar codes are usually used for identifying objects, they are used for recognizing how the paper is folded. In the proposed method, the position of a fold line is first estimated, and then detailed information regarding the folding operation is determined and a computer model is updated. The system was implemented on a PC, and its validity is confirmed.

1. はじめに

紙を折って形を作成する「折紙」は日本に古くから伝わる文化の1つであり、教育の場での活用や趣味の1つとして幅広い世代に親しまれている。近年では世界的にも広く認知され、その学術的な研究も多くされている。特に最近では計算機環境の発達と普及により、折紙を計算機で扱う研究も多い。しかしながら、折紙作品の折り方を他者に伝える方法は、いまだ古くから存在する「折り図」に依存している。折り図とは、折り工程を図で表現したものであるが、この折り図の作成は労力のかかる作業であり、このことが様々な作品を効率的に他者に伝達することを困難にしている。折紙の形状を計算機内に構築することができれば、折紙の構造を任意の角度から眺めることができ、またアニメーション表示による折り工程の提示などへ発展させ

ることができると考えられる。

折紙の形状を計算機内に構築する場合には、形状を平面多角形の集合などで表現した幾何情報と、それぞれの多角形の接続関係を表す位相情報を用いてモデル化することが一般的である。しかし、意図した形状のモデルを計算機内に構築するにはCGやCADの知識が必要となり、初学者には困難な場合が多い。一方で現実世界の紙を手で折って形を作ることは容易な作業である。そこで本稿では、手作業で実際に折りたたんだ紙をデジタルカメラで撮影し、その画像から自動で計算機内にモデルを構築する新しいインタフェースを提案する。これにより、折紙を計算機内にモデル化するための負担を軽減することができる。これを実現するには、画像解析や認識に関する研究の成果を活用することが考えられるが、折りたたまれた紙の写真画像から得られる情報は輪郭線情報だけであり、これらから折りたたみの構造を推測するのは難しい問題である。本研究では、近年広く普及している2次元バーコードを表と裏の両面に印刷した紙を準備し、これを用いた

† 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

折紙をデジタルカメラで撮影することで、その構造を容易に認識し、計算機内にモデルを構築する方法を提案する。なお、提案手法では平坦に折りたたまれる折紙のみを対象とし、各折り操作が行われるごとにデジタルカメラで垂直方向より撮影する。折り操作は1つの直線で紙を折るものとする。本研究は折りたたまれた紙の構造を認識しモデル化するための新しい方法を提案するとともに、2次元バーコードを用いた新しいインタフェースを提案するものである。

本稿の2章では関連する研究を紹介し、3章では折りたたみの構造を推定する原理について述べる。4章では本手法の詳細を述べ、5章で結果を、6章でその評価を、7章でまとめを、8章で展望を述べる。

2. 関連研究

2.1 折紙のモデル化

日本に古くから伝わる折紙の手法は、正方形の紙を折りたたむことによって様々な形を作るものであり、幾何の分野における研究題材として多く取り上げられている^{1),2)}。また、国内にとどまらず海外でも研究が行われており、近年では対象とする形状を計画的に生成する「設計」の概念が折紙にも導入されるようになってきている³⁾。

折紙を計算機で扱う研究として、内田ら⁴⁾は紙の物理的な制約条件をもとに、折紙の展開図を構成する幾何学的要素からできあがりを推論するプログラムを提案した。Miyazakiら⁵⁾は、計算機を用いて折紙を対話的に操作する手法を提案した。紙を折る操作によって折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。折紙の形状を計算機内に保持するデータ構造はシンプルであり、折り手順を含めた情報が、二分木を用いて保持される。ここで提案されたデータ構造を含むプログラムのソースコードはWeb上で公開されており⁶⁾、本研究で提案するシステムでは実装の一部にこれを使用した。Katoら⁷⁾は、教本に含まれる「折り図」の画像を計算機で解析することで、折り操作を推定し、それをもとに計算機内の折紙モデルを更新する手法を提案した。この手法は図中に含まれる矢印や折り線の情報を活用しているため、写真画像からのモデル構築には適用することができない。Juら⁸⁾は計算機とのインタフェースに関する研究の中で、無線タグを埋め込んだ紙を使用した折紙の教示を例題として扱った。無線タグの空間位置をもとに折紙の形状を計算機が把握できるようになっている。この手法は本研究の目指すところと共通する点が多いが、無線タグと読み取り機器という大がかりな装置が必要

となる点で一般的には扱いにくいという問題がある。三谷ら⁹⁾は計算機内に構築された折紙モデルに対し、その構造を理解しやすくするために、厚みや頂点のずれを追加して表示する手法を提案した。本研究では計算機内のモデルを表示する際にこの手法を用いる。

2.2 2次元バーコードの利用

一般にバーコードは、それが付随する個体の識別IDを格納するため、または個体に関する情報を格納するために使用される。近年では、従来の1次元バーコードよりも多くの情報を格納できるものとして2次元バーコードが開発され、様々なものが存在する¹⁰⁾。これらは、アパレル業界や医療機関、工場などでの物品管理用途などに幅広く使用されている¹¹⁾。また、ロボットの環境認識への応用¹²⁾など新しい用途への活用も研究されている。インタフェースの分野においても、計算機に物体を認識させるうえで広く活用されている。RekimotoらはCyberCodeという独自の2次元バーコードを考案し、3次元の位置情報の算出や、実画像とUIツールを重ね合わせて表示することによる、新しいインタフェースの提案などを行った¹³⁾。

2次元バーコードの1つであるQRコードは、早くから規格化され仕様が公開されている(ISO/IEC18004およびJIS-X-0510)ことと、高速な認識に適していることから、現在では携帯電話のカメラに標準で読み取り機能が備わっていることが多い。QRコードを読み取るためのAPIは市販されており、新規システムへも容易に利用できる環境が整っている。そこで本稿で提案するシステムでは、折りたたみの認識に用いる2次元バーコードにQRコードを使用し、読み取り機能の実装には文献14)のAPIを用いることとした。

3. 折りたたみ構造のモデル化の原理

3.1 状態の表現と折り操作

本研究では計算機内に折りたたまれた紙の構造を保持するために、Miyazakiらの提案する折紙モデルを使用する。このモデルでは、Stageと呼ばれる構造体が折紙の状態を表すために使用される。1回の折り操作の情報と、現在のStageの情報から、折り操作を行った後の状態を表す新しいStageが構築される。初期状態を $Stage[0]$ 、 n 回目の折り操作を $Fold[n]$ 、 n 回の折り操作を行った後の状態を $Stage[n]$ と表すと、これらの関係は図1のようになる。

本稿で扱う折紙の状態には、実際に人の手によって折られたものと、計算機の中に構築するモデルの2つが存在する。これらを区別するために、以降ではそれぞれを $Stage^{Real}[n]$ と $Stage^{Model}[n]$ と表すことと

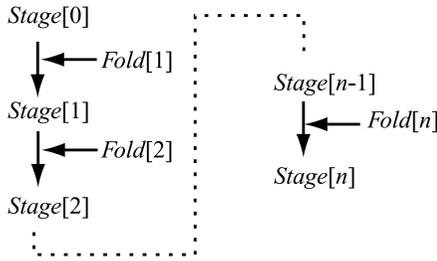


図1 折り操作 Fold による Stage の更新
Fig.1 Updating of Stages by Fold operations.

する。

本手法では平坦に折りたたまれた紙だけを対象とし、紙飛行機や折り鶴の翼を広げた状態のような立体的な構造を持つものは対象としないため、折り操作 $Fold[n]$ には、折り線の位置に関する情報と、それが山折りか谷折りのどちらであるかの情報、および紙が複数枚重なっている箇所（図8の例を参照）については何枚目が折り操作の対象となっているかの情報が含まれていければよい。折り角はつねに180度であるので、角度に関する情報は必要ない。

3.2 処理の流れ

本稿では図2に示すように、折る操作を1回行うごとにデジタルカメラで撮影し、そのつど計算機内のモデルを更新することで、複数回の折り操作で折りたたまれた紙のモデルを計算機内に構築するシステムを提案する。図2に示した処理の流れを以下にまとめる。

- (1) 折る前の紙 (a) を計算機内にモデル (b) として保持する。
- (2) 折り操作を1回行った様子 (c) をデジタルカメラで撮影し (d)、それと (b) を比較してどのような折り操作が行われたかを推定する (e)。
- (3) 推定 (e) に基づいて計算機内のモデル (b) を更新し、モデル (f) を生成する。
- (4) 引き続き、2回目の折り操作を行った様子 (g) をデジタルカメラで撮影し (h)、それを (f) と比較してどのような折り操作が行われたかを推定する (i)。
- (5) 推定 (i) に基づいて計算機内のモデル (f) を更新し、モデル (j) を生成する。

上記の(4),(5)の処理は、(2),(3)の処理の繰返しであるが、必要に応じて繰返しを増やすことで、回数が多い折り操作によって作成される形に対応する。つまり、 $Stage^{Real}[n+1]$ の写真と $Stage^{Model}[n]$ から $Fold[n+1]$ を推測し、 $Stage^{Model}[n]$ と $Fold[n+1]$ によって $Stage^{Model}[n+1]$ を構築することが、本研究で提案する手法である。

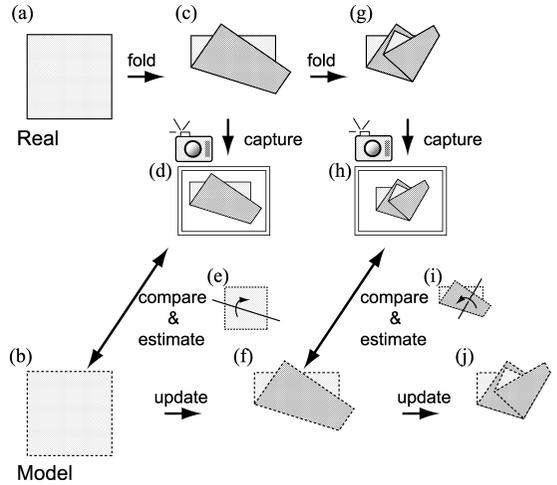


図2 処理の流れ
Fig.2 Flow.

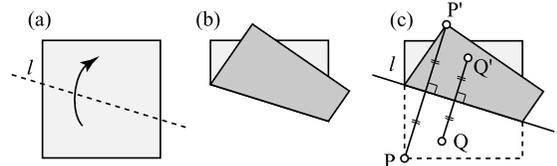


図3 折り線位置推定の原理
Fig.3 Estimation of the position of a fold line.

3.3 折り線推定の原理

図3(a)のように紙を折り線 l で谷折りし、図(b)の状態になった場合、この操作を計算機内のモデルに反映させるためには折り線 l の位置と折る向き(谷折りと山折りの区別)の情報が必要である。図3(c)のように、モデル上の頂点 P が移動した後の点 P' の位置が分かる場合、この2点の垂直二等分線を折り線と推定できる。しかし、 $Stage^{Real}[n+1]$ の写真と $Stage^{Model}[n]$ の間に対応する頂点を何の工夫もなしに画像処理だけで見つけ出すのは容易でない。問題解決として、頂点位置に色の付いたシールを貼るなどのマーキングによって、対応付けを容易にすることが可能であるが、折り操作を進めるたびに頂点の数は増えるので(図(a)では頂点数4であるが図(b)では6)現実的な対応は難しい。

ところで、頂点でなくても図(c)の点 Q と点 Q' ように、モデル上の特定の点の位置が分かるようにマークを付けておけば、この2点の垂直二等分線から折り線を推定することができるため、本研究では、事前に紙の上に複数のQRコードを分散配置し、そのQRコードを目印に利用する。QRコードに格納する情報や配置方法、折り線の推定方法などについては次章で

詳細を述べる．

4. 手法の詳細

4.1 QR コードの配置

提案手法では図4のように紙の両面にQRコードを格子状に配置する．それぞれのQRコードには、その位置と裏表の別を表すための5桁の数字をエンコードする．数字の1桁目は表裏の別(0:面, 1:裏)とし、2桁目と3桁目で何列目であるか、4桁目と5桁目で何行目であるかをそれぞれ2桁の整数で表現する．たとえば表面の6列7行目のQRコードには「00607」という数列を格納し、裏側の同じ場所には「10607」を表すQRコードを配置する．これにより、写真画像に含まれるQRコードをデコードすることで、その紙上で位置と面の表裏の別を識別できる(もっと効率の良いエンコード方法も考えられるが、QRコードの仕様上72ビットよりも小さいデータでは印刷サイズに違いがないため、デコードを効率化することに意味はない)．

紙の横幅と縦幅がそれぞれ W, H であり、QRコードが横方向に U 、縦方向に V だけ等間隔に配置され、デコードされたQRコードが i 列 j 行目であった場合、このQRコードの中心は紙の左上を原点として $(\frac{W}{U}(i+0.5), \frac{H}{V}(j+0.5))$ の位置にあることが分かる．紙の上に配置するQRコードの数(または大きさ)は、写真画像からの認識成功率と、折りたたみ形状を推定する精度のトレードオフで決定されるが、次章で述べる実験結果では20cm四方の紙に20×20のコードを配置することで実用的な成果を出すことができた．

4.2 撮影

QRコードを配置した紙を通常の折紙のように折り、折った後の様子をデジタルカメラで撮影する．ただし、本手法では折る前と折った後のQRコードの位置の変化に基づいて折り線の位置を推定するため、QRコードの位置関係の変化が把握できる方向から撮影する必要がある．つまり、図5(a)の点線で奥に折るような場合、(b)のように一方の面が他方の面に完全に隠された状態ではなく、(c)のように両方が見える側から撮影する．ちょうど半分に折るような場合はQRコードの位置関係の変化が把握できないという問題があるが、これについては4.7節で対処方法を述べる．得られたコードから折り線の推定が得られなかった場合には、撮り方に問題があるのではないかとユーザーに確認を促す機能を備えることも可能である．図3のような折り方の場合は、一方が他方を完全に隠すことはないため、どちらから撮影してもかまわない．

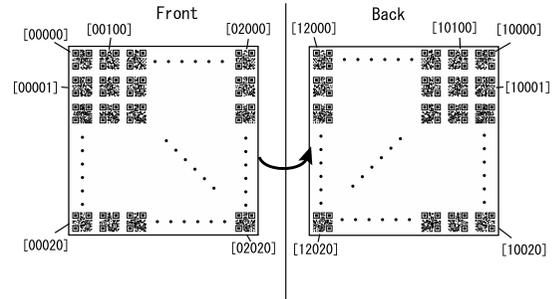


図4 QRコードの配置(正方形の紙に縦横20ずつ配置した場合)
Fig. 4 Arrangement of QR codes (placing 20 × 20 codes on a square sheet).

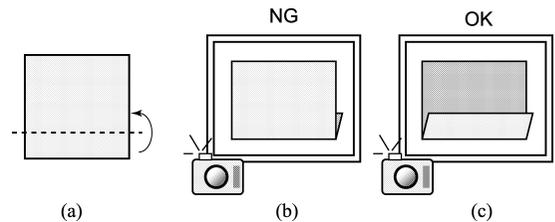


図5 撮影

Fig. 5 Taking a photo.

4.3 座標変換

本稿で提案する手法では、 $Stage^{Real}[n+1]$ の写真と計算機内に構築されているモデル $Stage^{Model}[n]$ を比較して折り操作を推定するため、まず両方で座標系を統一する必要がある．ここでは、写真の座標系(写真座標)から計算機内のモデルの座標系(モデル座標)への変換を行い、両者をモデル座標で比較することとする．カメラレンズの収差による歪みがないという仮定の下、変換行列を A とすると、 A は拡大率 s のスケール変換と角度 θ による回転および (d_x, d_y) の移動量による平行移動をともなう次のような3×3の同次変換行列で表現できる．

$$A = \begin{bmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta & d_x \\ s \sin \theta & s \cos \theta & d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

上記行列の未知数は4であるため、2つのQRコードの写真座標での位置とモデル座標での位置が分かれば A を導出できる．基準とする2つのQRコードは図6の点 X と点 Y のように、 $Stage^{Real}[n+1]$ の写真画像に含まれ、なおかつ $Stage^{Model}[n]$ の中でその点での法線の向きが同一(この場合は手前に向かう方向)であればよい(図中の点 Z は $Stage^{Model}[n]$ の中で裏側に存在し、法線の向きが奥に向いているため点 X と点 Z のペアは基準に使用できない)．この

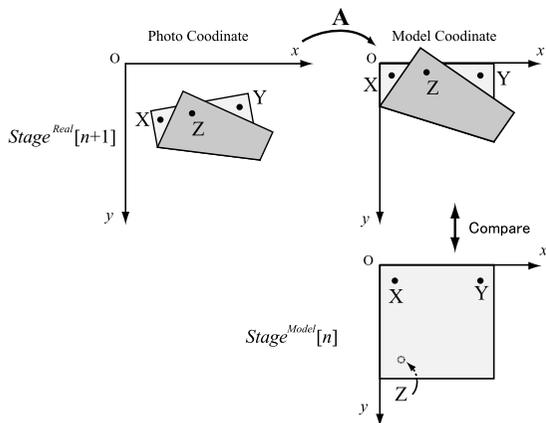


図 6 座標変換

Fig. 6 Coordinate transformation.

ような条件を満たす任意の 2 つの QR コードから変換行列を算出し、写真に写った QR コードをモデル座標に変換する。ただし、誤差を小さくするために互いに最も離れている 2 点を選択することとする。

4.4 折り線位置の推定

前出の変換を用いて $Stage^{Real}[n + 1]$ の写真画像に含まれる各 QR コードをモデル座標に変換し、 $Stage^{Model}[n]$ での各座標値と比較する。このときに、誤差によって値が多少異なるものが存在するが、特に大きく異なる QR コード（たとえば図 6 の点 Z）が存在する場合、これは折り操作によって位置が変わったものであると判断できる。このようなコードのうち、最も移動量の大きいものについて、 $Stage^{Model}[n]$ での座標と $Stage^{Real}[n + 1]$ の写真画像から算出した座標を図 3 に示す点 Q と点 Q' として用いることで、折り線の位置を推定する。なお、本システムを実装する際には、折り操作による位置の変化ではなく誤差によるものだと判断する閾値は紙の幅の 5%程度に設定した。写真画像に含まれるすべての QR コードが折り操作によって位置が変化しなかったと判断された場合は 4.7 節で述べる「二等分折り」がされたものと判断する。

4.5 折り方向の推定

折り線の位置が決まっても、折り方には図 7 の (a) と (b) のように谷折りと山折りの 2 通りが存在する。この折り方向を決定するために、まず計算機モデルに対して両方の折り方を試し、それぞれの折り方を行ったときに外部から見える QR コード群を算出する。この QR コード群と、実際に写真から抽出された QR コード群を比較し、両者に含まれる QR コードの数が多い折り方を正しい折り方として採用する。この

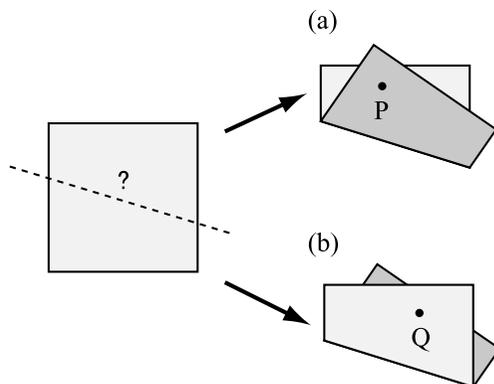


図 7 谷折りと山折り

Fig. 7 Folding direction: valley and ridge.

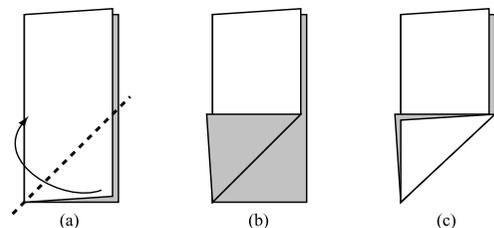


図 8 一重折りと多重折り

Fig. 8 Single folding and multiple folding.

ようにして可能性のある複数の折り方から最適なものを決定する方法を、以降では簡単のために「可視コード群比較法」と呼ぶこととする。

4.6 一重折りと多重折りの判別

図 7 のように、折り曲げられる対象となる面が 1 つである場合、前節で述べた折り方向が決定すれば、折り方は一意に定まるが、図 8 のように折り曲げの対象となりうる面が複数存在する場合、折る対象となる面と対象とならない面を明らかにする必要がある。図 8 (b) のように、1 枚の面だけを折る場合を一重折りと呼び、(c) のように複数の面を同時に折る方法を多重折りと呼ぶ。図 8 (a) の場合は (b), (c) の 2 通りしか存在しないが、場合の数は折ることが可能な面の数に依存する。このように折る対象となる面が複数ある場合は、とりうるすべての場合を計算機モデルに対して試し、前節と同様に「可視コード群比較法」で最適な折り方を決定する。

4.7 二等分折りへの対応

図 9 のように、折り線によって元の形が二等分されるような折り方を「二等分折り」と呼ぶこととする。この場合、折りたたまれた形をどちら側から見ても、相対的に場所が変化した QR コードが存在しないため、4.4 節で述べた方法では折り線の位置を推定でき

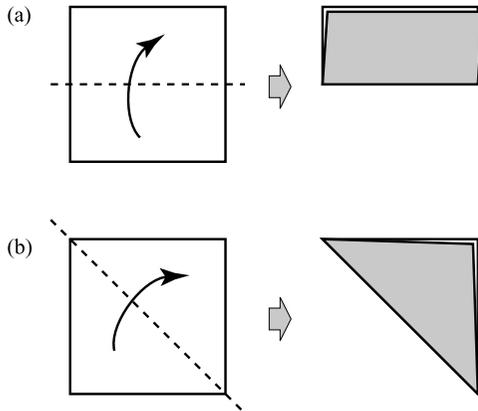


図 9 二等分折り
Fig. 9 Median folding.

ない．そこで，4.4 節の方法で折り線位置が推定できなかった場合は，二等分折りが行なわれたものと判断し，可能なすべての二等分折りを計算機モデルに対して試行し，「可視コード群比較法」で最適な折り方を決定する．二等分折りが行われる場合は，少なくとも 1 つの頂点が他の頂点に重なるように移動するので，すべての頂点の組合せから得られる二等分線について，それぞれを折り線であると仮定した試行を行う．この方法だと，二等分折りでないケースも含まれるが，可能な二等分折りは必ず含まれ，また実装が容易であるという利点がある．

4.8 折り線を元にした計算機モデルの更新

前節までに述べた手法により，折り操作の情報 $Fold[n+1]$ を決定できるため，これと $Stage^{Model}[n]$ をもとに $Stage^{Model}[n+1]$ を生成して計算機内のモデルを更新する．本システムではデータの保持に Miyazaki らの提案を採用しているため，データの更新方法についても同様に Miyazaki らの提案手法を用いる．

5. システムの実装結果

本稿で提案するシステムを CPU Pentium Mobile Processor 2.0 GHz, RAM 1.0 GB の PC 上に実装し検証を行った．QR コードはバージョン 1 (21 セル四方．最もセル数の少ないバージョン)，誤り訂正能力レベル H (最も高いレベル) を用い，20 cm 四方の紙に縦横 20 ずつの計 400 を配置した．この紙に対して折り操作を行うたびに，2,048×1,536 ピクセルの解像度でデジタル撮影した．

図 10 (a) は検証に使用した紙を撮影したものであり，(b) は本システムのアプリケーションウィンドウ

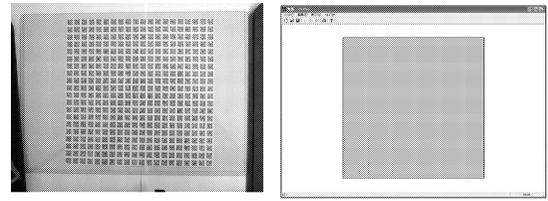


図 10 初期状態の写真とモデル表示

Fig. 10 A photograph and a model display of the initial state.

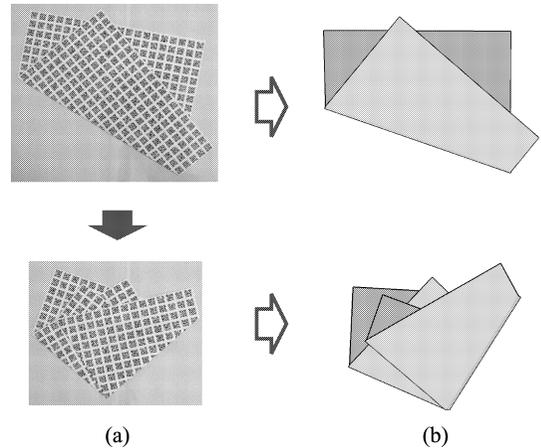


図 11 一般的な折り方
Fig. 11 General case.

で初期状態の折紙モデルを表示した様子である．折紙モデルの表示には，文献 9) で提案されている厚みを強調する手法を用い，構造を把握しやすいようにしている．

一般的な折り方

本稿で提案する折り線の推定手法が妥当であることを検証するために，一般的な折り方 (二等分折りではなく，かつ多重折りの場合分けを考慮する必要のない折り方) を 2 回行った結果を図 11 に示す．(a) は撮影された写真の画像である．システムではデジタルカメラで撮影したものをそのまま入力として使用しているが，(a) は分かりやすくするために必要な箇所だけをトリムしている．結果の (b) は，本手法で得られたモデルをアプリケーションウィンドウに表示したものである (以降の図も同様である)．実際の紙の形状を計算機のモデルに反映できたことが確認できる．

二等分折り

長方形に二等分折りし，さらにそれをもう一度二等分折りした結果を図 12 に示す．

一重折りと多重折り

一重折りと多重折りの存在する例題として，「ヨッ

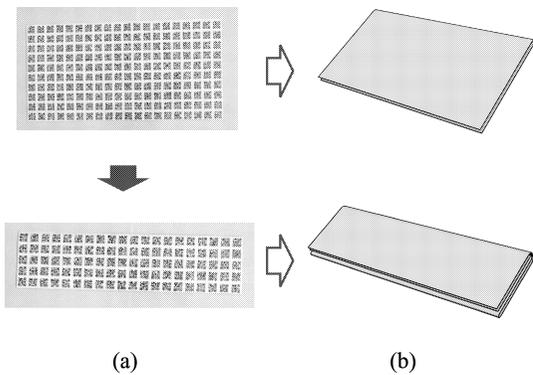


図 12 二等分折り
Fig. 12 Median folding.

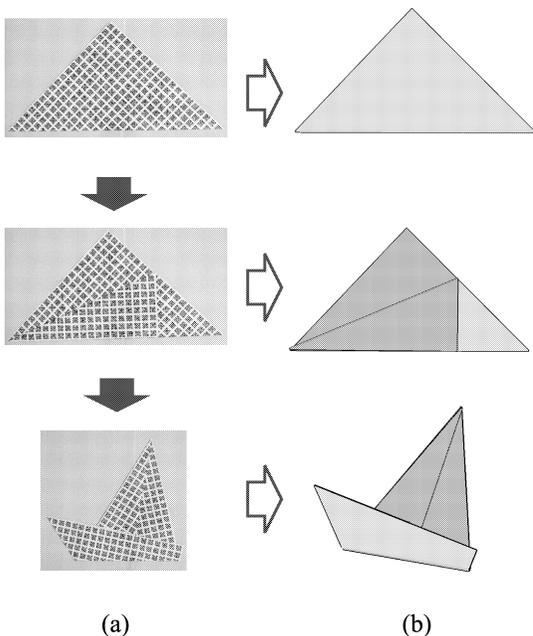


図 13 一重折りと多重折りの判別が必要な例 (ヨット)
Fig. 13 An example that requires single folding and multiple folding (Yacht).

ト」を折った結果を図 13 に示す。1 回目の折操作は三角形への二等分折りであるが、2 回目の折り操作では、折り操作の対象となる面が 1 枚なのか 2 枚なのかを識別する必要がある。

複合的な例

より複雑な例として、「セミ」を折った結果を図 14 に示す。最後まで折るには 9 回の折り操作が必要になるが、紙幅の都合上途中の一部を省略している。最終的にできあがった形を正しく計算機に取り込むことができた。

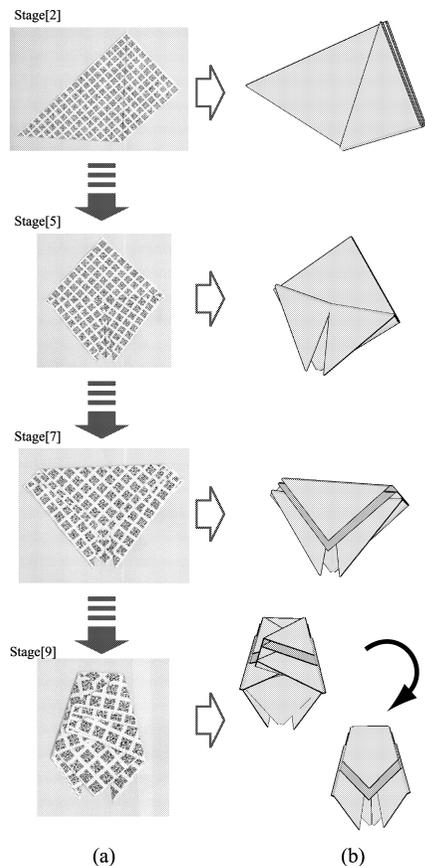


図 14 複合的な例 (セミ)
Fig. 14 A composite example (cicada).

6. 評価

計算時間

QR コードの読み取りに使用した API には設定可能なパラメータが複数あり、その設定によって読み取り時間と精度は異なったものになるが、今回は精度を優先することとした。400 個のコードが含まれる図 10 (a) の写真を処理するのに要した時間は 20 秒であった。また、そのときに認識できたコードの数は 391 (全体の約 97%) であった。図 14 下段の最も QR コードが少ない写真は約 1 秒で処理することができ、目視で全体が写っていることが確認できる 17 個のコード中 16 個 (94%) を正しく読み取ることができた。読み取ったコードから折紙モデルを構築する処理は、図 13 の最終ステップで 0.15 秒、図 14 の最終ステップで 3.34 秒であった。今回は特に高速化の工夫を施していないため、たとえば「可視コード群比較法」での可能性のない折り方を効率良く省くなどの改善で、より高速にモデルを構築することが可能であると考えられる。

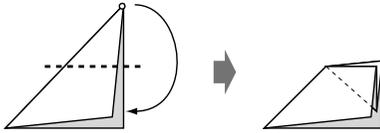


図 15 折り込み

Fig. 15 Tack-In folding.

誤 差

本手法で用いる入力カメラで撮影された画像であるため、得られる QR コードの座標値には誤差が含まれる。一度も折り操作を行っていない状態（図 10(a)の状態）で得られる値と理論値の誤差を実験により計測したところ、平均 1.2 mm、最大 1.9 mm の誤差が存在した（ただし 4.7 節で述べた二等分折りを行った場合には、頂点の位置を合わせるため、誤差が出ない）。そのため、折り線の推定に紙上で最も離れた対角線上の 2 点（互いの距離が約 28 cm）を用いた場合、折り線の角度の誤差は最大で $\tan^{-1}(3.8/280) = 0.8$ 度程度と考えられる。仮に最も近い 2 点（互いの距離が 2 cm）を用いて折り線の位置を推定した場合の角度の誤差は最大で $\tan^{-1}(3.8/20) = 10.8$ 度程度と考えられるが、折り線の推定ではなるべく離れた 2 点を用いているようにしているため、この値よりは小さく抑えられるものとなる。実際の折紙では、最初の折り方は誤差のない二等分折りであることが多いことと、最も小さい折り方が QR コードの配置間隔である 1 cm 以上であることを考慮すると、数度の角度の誤差が数回重なっても完成形に与える影響は小さいと考えられる。

適用可能範囲

本手法では、1 つの直線で紙を折る単純な操作のみを対象としているため、図 15 に示すような「折り込み」操作を扱えないという制約が存在する。

多数の折紙作品の折り方を紹介している Web サイト「おりがみくらぶ」¹⁵⁾ 上の、幼児を対象とした「かんたんなおりがみ」に含まれる全 40 種類のうち、本提案手法で折りたたみ構造を認識できる作品は 32 種であった（全体の 80%）。一方で鶴やヤッコさんのように、伝承的に折られている作品を集めた「むかしからのおりがみ」では、紹介されている 28 種類から「風船」のように立体的な作品を除いた 19 種類のうち、本提案手法で折ることが可能な作品は 5 種（全体の 26%）であった。このように、幼児を対象とした単純な作品であれば、本手法を適用できる作品は多いが、より複雑な作品に適用するには、適用可能な折り方を増やす必要があると言える。

7. ま と め

本稿では QR コードを紙の両面に印刷し、それを撮影したデジタル画像から折紙のモデルを計算機内に構築する新しいインタフェースを提案した。提案手法を PC 上に実装して検証することで、簡単な折紙であれば本手法が有効に機能することを確認した。本システムは、一般的な PC とプリンタ、およびデジタルカメラがあれば十分である。特別な装置を必要としない、安価に構築可能な環境で、現実世界での紙を折る操作で計算機内の仮想的な折紙モデルを更新できることを示せた。システムでは 1 つの折り操作に対して 1 つの写真を読み込む必要があるが、複数の写真を連続的に読み込むことで複数回の折り操作を一括で処理できるため、ユーザは読み込むファイルを最初に 1 度指定するだけでよい。従来のマウスとキーボードを使用した折紙モデルの操作に比べ、きわめて簡単に折紙の形を計算機内に構築することが可能となった。ただし、本手法では平坦に折りたたまれるケースのみを対象としているため、立体的な構造を持つ形には対応できないという制約がある。さらに、1 つの直線で紙を折る単純な操作では作成できない折紙作品には対応できないという問題も残されている。

8. 展 望

「折り込み」の操作に対しては、一部がはみ出して見える場合は、原理的には折り方を推定できるはずであるが、提案手法では「1 つの直線で折り曲げる操作」のみを対象としているため、このような折り込み操作は扱うことができない。より多くの折紙作品に対応するためには、人の手による対話的な指示を受け入れる柔軟性を追加する必要があると考えられる。また、本システムでは立体的な構造を持つ折紙は扱えないが、たとえば複数のカメラから撮影したり、CyberCode¹³⁾ による位置情報の取得を行ったりすることで問題が解決できる可能性がある。さらに静止画ではなく動画を継続的にキャプチャすることで、実際の折り操作とリアルタイムに連動して折紙モデルを更新させるインタフェースを実現することも可能であろう。

本手法で用いた QR コードは現在広く普及しており、その出力と読み取りを行えるソフトウェアも入手しやすくなっている。そのため、システムの実装を容易に実現できるものとして QR コードを選択したが、より細かい折り紙作品に対応するためには、より小さいサイズで必要な情報を格納できるコードを考案することが効率的なアプローチであると考えられる。古く

から折紙に使われてきた「千代紙」の柄(模様)を位置情報の取得に活用できれば, QRコードが印刷された特殊な紙を用意せずに本手法で提案するアプローチを使用できる可能性がある。

本稿では, 計算機内でモデル化する対象に折紙を用いたが, これ以外にも一定の拘束条件のある物体(たとえばリンク構造を持つ変形構造物など)に QRコードを分散配置することで, その物体がどのような状態にあるのか認識することにも応用可能と考えられる。

謝辞 本システムの実装において, QRコード読み込みにソフトアドバンス株式会社の「QRコードソリューションキット」を, 折紙の構造保持のために Web上で公開されている宮崎慎也氏のプログラムコードを使用させていただいた。また, 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究 B, 課題番号 17700131)による助成を受けて行ったものである。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 川崎敏和: バラと折り紙と数学と, 森北出版(1998).
- 2) 深川英俊: 折紙の数学, 森北出版(2002).
- 3) Lang, R.J.: *Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art*, AK Peters, Ltd. (2003).
- 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) 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).
- 6) 宮崎慎也: 折り紙シミュレーション.
<http://www.om.sccs.chukyo-u.ac.jp/main/research/origami/indexj.html>
- 7) Kato, J., Watanabe, T., Hase, H. and Nakayama, T.: Understanding Illustrations of Origami Drill Books, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.6, pp.1857-1873 (2000).
- 8) Ju, W., Bonanni, L., Fletcher, R., Hurwitz, R., Judd, T., Post, R., Reynolds, M. and Yoon, J.:

Origami Desk: Integrating Technological Innovation and Human-centric Design., *Proc. Designing Interactive Systems 2002*, pp.399-409 (2002).

- 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) 岩間 司, 白江久純, 西浦稔修, 鈴木こおじ, 上釜和人: 2次元バーコードを用いた郵便情報システムに関する調査研究, 郵政研究月報, No.8, pp.24-38 (2000).
- 11) メトロロジック・ジャパン株式会社: 2次元バーコードの応用事例.
<http://www.metrologic.co.jp/apply/index.html>
- 12) 太田 順, 新井民夫: 二次元コードを用いたサービロボット<バーコードを利用したロボット作業環境の整備>, 月刊バーコード, Vol.12, No.5, pp.12-16 (1999).
- 13) Rekimoto, J. and Ayatsuka, Y.: CyberCode: designing augmented reality environments with visual tags, *DARE '00: Proc. DARE 2000 on Designing augmented reality environments*, New York, NY, USA, pp.1-10, ACM Press (2000).
- 14) ソフトアドバンス株式会社: QR Code Solution.
<http://www.softadvance.co.jp/qr/index.html>
- 15) CITY PLAN Co., Ltd.: おりがみくらぶ.
<http://www.origami-club.com/>

(平成 18 年 9 月 20 日受付)

(平成 19 年 5 月 9 日採録)



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。コンピューターグラフィックスおよび計算機を用いたペーパーワーク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。