折り紙の展開画像からの幾何的な制約に基づく情報復元手法

宮石 千裕† 三谷 純†† ‡ 福井 幸男††
†筑波大学第三学群情報学類 ††筑波大学大学院システム情報工学研究科 ‡科学技術振興機構 さきがけ

1. はじめに

折り紙に関する研究が数多く行われているが、その中の1つに、折り紙の折り線の構造から折りたたみ後の形状を推測する研究が進められている[1]。本研究では、これらの研究に必要となる折り紙の展開図を、計算機に効率的に取り込む手段を提案する。具体的には、実際に手作業で折りたたんだ折り紙を開き、それをスキャナで読み込んだ画像から折り線の位置を算出することを行う。展開図には折り紙固有の幾何的な特性があり、画像処理だけで妥当な展開図を復元するのは難しいが、検出した線分に展開図の特性・制約を考慮した幾何処理を施すことで、計算機上へ妥当な展開図を再構築することが可能となると考えられる。

折り紙の作品には多様なものが存在するが、ここで扱うものは完成形が平坦となる「平坦折り紙」とする。展開図が平坦に折りたためるかどうかの判定に、折り紙展開図エディタORIPA[1]を用いる。ORIPAでは、折り紙の展開図を入力することにより、折りたたみ後の形状が自動的に推測される。[図1]は、兜の折りたたみ後の形状とその展開図である。本研究にでは、山折り・谷折りの線の種類は、ORIPAへ読み込み後ユーザーが指定することとする。

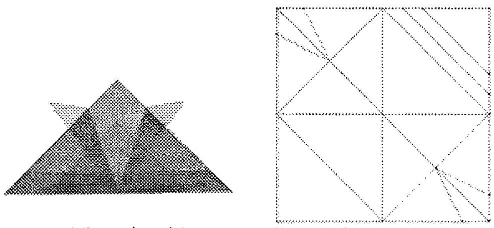


図1 兜の折りたたみ後の形状とその展開図

2. 関連研究

画像からの直線の検出にはHough変換[2]を用いる。その後、折り紙の幾何的な制約を適用し折り線の復元を行うが、折り紙が平坦に折りたためる条件として、折り紙の局所平坦条件を用いる。

2.1 Hough変換

Hough変換は、 Paul Houghによって’62年にアメリカで特許申請された手法で、読み込まれた画像から直線を検出するアルゴリズムである。直線の検出の場合、元になる直角座標上の点 (x, y) を角度 θ と原点からの距離 ρ の二次元空間に変換し、角度 θ と距離 ρ 毎に、その個数（すなわち、ピクセルの数）をメモリ上に加算してゆく。個数が最大になった組み合わせ（角度 θ と距離 ρ の）を元の直角座標に戻したのが、最も直線らしい点の集まり（最も多くの点が並んでいる）であるといえる。個数を下げていくと、次の候補が順次得られることになる。

2.2 折り紙の局所平坦条件

与えられた展開図が平坦に折りたためるために必要十分な，展開図の内点に接続している折り線の条件（局所平坦条件）は参考文献[3]～[5]より明らかにされており，次の通りである。

(1) 折り線の数は偶数である
(2) 山折線の数と谷折線の数の差の絶対値は2である
(3) 折り線の成す角のひとつおきの和は180° である
(4) 折り線の成す角が鈍角の時，その角をはさむ2つの線の折り線属性（山折/谷折）は等しい

これらの条件を全ての内点が満たす展開図は平坦に折りたたむことができ，条件を満たさない展開図は平坦に折りたたむことができない。

3. 提案手法

3.1 頂点と折れ線のグラフ構造

Hough変換を施したのみの画像は、目標とする展開図よりも多数の線分を検出していることが多い。そこで、検出結果の直線群から必要となる線分のみを抽出する。

1. 近傍に複数の線分が存在している場合には1本として認識する（図2）
2. 延長線上に存在すると考えられる2つの線分間の隙間が閾値より小さい場合は連結する（図3）

以上の処理をすべての線分に施す。[図4(a)]の読み込み画像に対し、[図4(b)]がHough変換のみを行った画像である。これに以上の処理を行い、[図4(c)]の結果を得る。

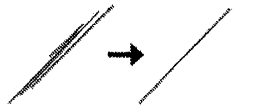


図2 複数の近傍線分の合成

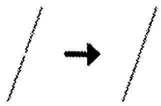
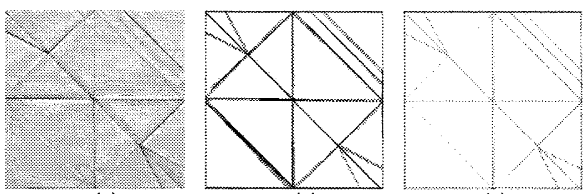


図3 線分の途切れの補正



(a) (b) (c)

図4 (a)読込画像、(b)Hough変換処理、(c)後処理済

次に、画像上の線分を頂点とそれらのリンクによる無向グラフへと変換する。[図5]のように、抽出した線分の

The restoration method of Origami based on the geometry restrictionsfrom the unfolded image

Chihiro Miyaishi†, Jun Mitani†† ‡, Yukio Fukui††
†College of Information Science, University of Tsukuba
††Department of Computer Science, University of Tsukuba
‡PRESTO, Japan Science and Technology Agency

交点をすべて検出し、他の線分との交点が存在する線分は、交点で切り分ける。[図5]では、切り分けたことにより、2本だった線分が4本に分割される。

また、[図6]のようにその頂点の近傍に他の頂点が存在する場合、二つの頂点を合成し１つとする。

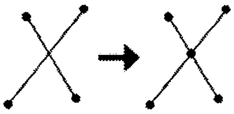


図5　交点での分割

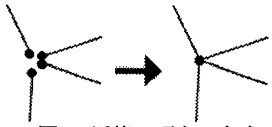


図6　近傍の頂点の合成

3.2 頂点位置の修正

各頂点に対し、局所平坦条件を満たすよう位置を補正する。まず、折り紙の折り手法のうちの、

1. 辺と辺を付けて折る
2. ある辺に平行に折る

以上の折り方に着目する。1より、[図7]のように頂点の座標が画像の縦横の等分の位置に近い場合にはその位置へ補正を行う。[図7]では、各頂点は画像の1辺を4等分した位置にある。2より、[図8]のようにある1辺が垂直あるいは水平に近い線分は、完全に水平あるいは垂直になるよう頂点位置を補正する。

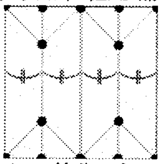


図7 辺の等分である場合

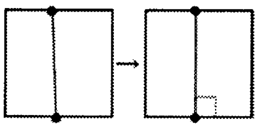


図8 辺が垂直に近い場合の補正

次に、各頂点に対し、折り紙の幾何的制約から、頂点移動に伴う制約について以下の条件で4段階にランク分けを行う。Aが最も制約が強く動かしづらい頂点、Dが最も制約がゆるく動かしやすい頂点である。

A：画像の四隅に重なる頂点

B：画像の端に接していない点

C：画像の端に接しており、かつ、その頂点から伸びる辺が２つ以上

D：画像の端に接しており、かつ、その頂点から伸びる辺が１つのみ

[図9]は、左が兜の展開図、その各頂点に対しランク分けを行うと、右のようになる。

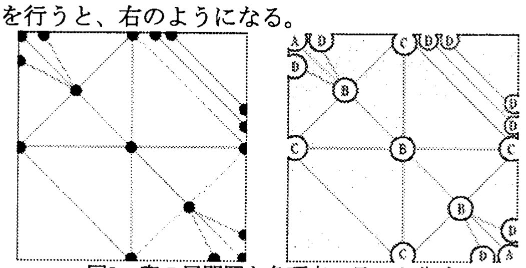


図9　兜の展開図と各頂点のランク分け

点の位置の制約が強い、Aの頂点から順に位置を決定していく。Aの頂点は画像の四隅のいずれかのため、必ず１箇所に決定される。

B以降の頂点の位置は、2.2節に記した局所平坦条件の(3)を満たすかどうかに着目し補正していく。Bの頂点の内、その頂点から伸びる辺が多い順に選択し、任意の方向へ微少距離の移動を行い、その頂点が条件を満たす方向に近づくか否か判定する。2分法の原理を用い、近づいた場合は同一方向へ移動させ、遠ざかる場合には逆方向へ半分の距離の移動を行う。どちらへ動かしても遠ざかる場合には、移動の方向を変更する。それを繰り返し、その頂点が平坦折り条件を満たした場合、または規定回数以上処理を繰り返しても平坦折り条件を満たさない場合には、そこでその頂点の位置を決定し、より制約の弱い頂点の移動へと移行する。

C、Dの頂点は、[図10]のようにC、Dの頂点と繋がるBの頂点が条件を満たすよう移動する。Dの頂点はただ１つのB頂点に繋がるのみなので位置は決定できる。[図10]の例では、αの和が180度になる位置にDを移動させれば良い。しかし、現段階では、２つ以上のB頂点に影響を及ぼすことになるC頂点の移動に対し的確な手法は提案出来なかった。

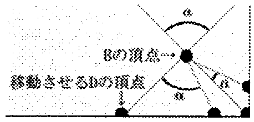


図10　C、Dの頂点の移動制約

4. 結果

現時点で、Hough変換適用後の線分の抽出、交点検出、頂点のランク分けまでを行った。頂点の移動については、ランクがCの頂点の移動への的確な提案手法が提案出来ていないため、終了していない。例として兜の展開図を用いる。[図4]が読込画像、[図11]が現段階までの補正終了後の結果である。

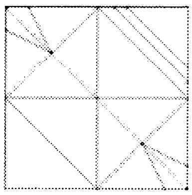


図11　補正後結果

5. 今後の課題

現段階では、すべての頂点が平坦折り条件を満たすようには移動できなかった。Cの頂点への的確な移動手法の考案、あるいは移動手法の改善が必要である。また、頂点位置の決定について、折り紙の折り手法によって生まれる対象性を用いること、角の等分によって折り線が作られていることをさらに考慮した場合、より平坦折り条件を満たす頂点位置の決定に近づき、理想的な展開図が得られるのではないかと考えられる。

参考文献

[1] 三谷純："折紙の展開図専用エディタ(ORIPA)の開発および展開図からの折りたたみ形状の推定", 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.9, pp.3309-3317(2007)

[2] P.V.C.Hough: "Method and Means for Recognising Complex Patterns," U.S.Patent No.3069654,1962.

[3] T. Kawasaki: "On the Relation Between Mountain-creases and Valley-creases of a Flat Origami", Proceedings of the Second International Meeting of Origami Science and Scientific Origami, pp.229-237(1989)

[4] J. Justin: "Towards a Mathematical Theory of Origami", Proceedings of the Second International Meeting of Origami Science and Scientific Origami, pp.15-29(1997)

[5] T. Hull: "On the Mathematics of Flat Origamis", Congressus Numerantium, Vol.100, pp.215-224(1994)