

2005年度 卒業論文

切れ込み表現を含む
折り紙シミュレーション

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 3DCG コンポーネントプロジェクト

学籍番号 M0102101

小濱 啓志

2005年度 卒業論文概要

論文題目

切れ込み表現を含む
折り紙シミュレーション

メディア学部

学籍番号：M0102101

氏名

小濱 啓志

指導
教員

渡辺 大地講師

キーワード

折り紙、3DCG、Half-Edge 構造、多角形分割

折り紙は日本の伝統文化の一つであり、国内外問わず幅広く普及している。また、折り紙に関する研究も数多く行われており、研究対象としても注目されている。特に、コンピュータ上で折り紙を3DCGで再現し、現実の折り紙と同様に折ることを目的とした折り紙シミュレーションに関する研究は、以前から数多く行われている。近年ではコンピュータグラフィックス技術の向上に伴い、操作性や紙の重なりを描画方法などが改善され、より現実に近いシミュレーションが構築されている。

折り紙作品には、作成の段階で切れ込みを入れる必要があるものが数多くある。しかし、従来の折り紙シミュレーションでは紙を変形させる動作を折りに限定しているため、これらの作品を再現出来ていない。そこで本研究では、切れ込み作成と折りの両方の変形動作を行える折り紙シミュレーションを開発し、作成出来る作品の幅を広げることが目的とする。従来の折り紙シミュレーションは、折り動作を念頭においてデータ構造を作っているため、切れ込み作成に対応出来ない。本研究では、切れ込みを考慮した折り紙シミュレーションを実現するために、データ構造にHalf-Edge構造を採用する。Half-Edge構造を用いた折り紙シミュレーションを提示し、そのシミュレーションに対応した切れ込み作成の手法を手案することにより、切れ込みと折りの動作の両立を実現する。また、非凸多角形を描画するときが発生する問題を、複数の三角形に分割することにより解決した。最後に、本研究で作成したシミュレーションで従来の折り紙シミュレーションでは作成出来なかった切れ込みを含む折り紙作品を作成し、研究の成果と今後の展望について検証した。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	折り紙シミュレーションのためのデータ構造	4
2.1	Half-Edge 構造	4
2.1.1	頂点	6
2.1.2	稜線	6
2.1.3	半稜線	6
2.1.4	ループ	6
2.2	Half-Edge 構造を用いた折り動作	7
2.2.1	基本的な折り動作の場合	7
2.2.2	多重折りの場合	8
第3章	切れ込み部分の表現	10
3.1	切れ込みの作成方法	10
3.2	非凸多角形の描画時の問題と解決方法	14
3.2.1	y 単調な多角形への分割	14
3.2.2	y 単調な多角形の三角形分割	17
第4章	結果と考察	21
4.1	結果	21
4.2	考察	24
4.3	今後の展望	24
	謝辞	25
	参考文献	26

目 次

1.1	1 枚の紙に切れ込みを入れて作った折り鶴	2
1.2	1 枚の紙に切れ込みを入れて作った立方体	2
2.1	Half-Edge 構造の各要素	5
2.2	頂点 V_1 の移動先を V_1' に指定した図	8
2.3	多重折りが発生する状況	9
3.1	切れ込みを作成する場所を指定する	11
3.2	切れ込みの間隔を指定する	12
3.3	頂点を移動して切れ込み部分を完成させる	13
3.4	多角形を構成する頂点とベクトル	15
3.5	非凸多角形に含まれる頂点を 5 種類に分類した図	16
3.6	分離点、統合点で多角形を y 単調な多角形に分割する	17
3.7	多角形の各頂点を 3 つの頂点列に分類したもの	18
3.8	上から 2 番目と 3 番目にある頂点で多角形を分割する場合	19
3.9	上から 1 番目と 3 番目にある頂点で多角形を分割する場合	20
3.10	多角形を三角形に分割した図	20
4.1	四隅に切れ込みを入れた折り紙モデル	21
4.2	四隅の切れ込み部分の片側だけ折る	22
4.3	折られていない切れ込み部分を順番に折る	23
4.4	完成図	23
4.5	面の内部に切れ込みを入れて作った形状	24

第 1 章

はじめに

折り紙の歴史は古く、日本で和紙が普及し出した奈良・平安時代から、貴族社会において儀礼や祭りに用いられていた [1]。近代では、その手軽さや文化的価値から教育分野での教材としての活用や、建築用の模型、老化防止やリハビリテーションなど、さまざまな分野で用いられている。また、折り紙が日本に古くから伝わる伝統文化であることから、異文化コミュニケーションの手段として使われることも多い。そして、このような幅広い需要と長い歴史を持つ折り紙を、リアルタイム 3DCG を用いて再現しようとする研究は以前から数多く行われている [2][3][4][5][6]。

折り紙をリアルタイム 3DCG で再現する研究の代表的なものに、宮崎ら [4] の研究がある。宮崎らは、3次元の仮想空間上で紙を自由に折るプロセスをリアルタイム操作で実行できるシミュレーションシステムを開発した。このシミュレーションシステムでは、折り曲げ、折り返し、折り込みの 3種類の動作を用意し、これらを組み合わせることにより実際の折り紙と同様に紙を複雑な形状に加工できるようになっている。また、横山ら [5] による紙の厚さを考慮にいたした折り紙シミュレーションや、三谷ら [6] によるレンダリングを用いた重なりを表示方法などの、描画のための研究も数多く行われている。

上記の研究をはじめとする従来の折り紙シミュレーションでは、紙の形状を変形させるための動作を、紙を折ることに限定していた。しかし、折り紙作品には折るだけではなく切れ込みを入れないと作れないものも数多くある。図 1.1 は連鶴

[7]と言われる、古くからある折り紙作品である。また、図1.2は寄せ上げ折り [8] と呼ばれる新手法を用いて作られた立方体である。従来の折り紙シミュレーションでは、このような切れ込みが必要な作品を作ることが出来なかった。

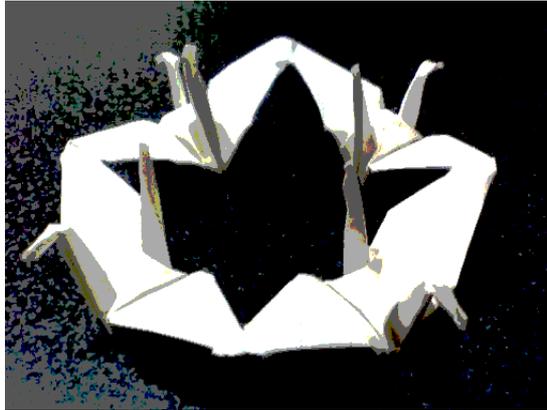


図 1.1: 1 枚の紙に切れ込みを入れて作った折り鶴

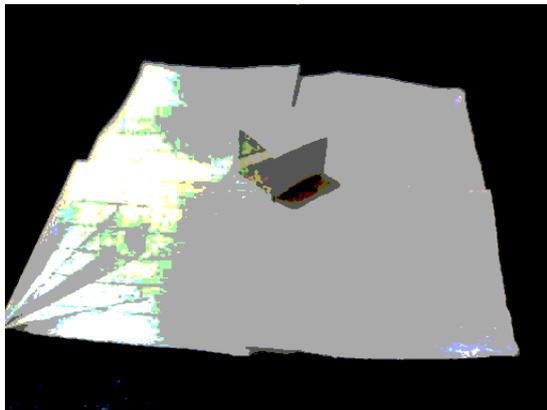


図 1.2: 1 枚の紙に切れ込みを入れて作った立方体

この点を踏まえた上で、本研究では従来の折り動作に加え、切れ込みを作成する動作も行える折り紙シミュレーションを目的とする。従来の折り紙シミュレーションでは、紙の形状を保存するための独自のデータ構造を作ることにより、折り動作を行っていた。しかし、そのようなデータ構造は紙を折ること以外の変形に対応していない。よって、折り紙シミュレーションに切れ込み表現を導入するためには、紙を表現するためのデータ構造から検討しなおす必要がある。そこで本研究では、折り紙の形状を表現するデータ構造に Half-Edge 構造 [9] を採用した。Half-Edge 構造は、一般の 3D モデルを表現する汎用的なデータ構造の一つであり、様々な変形に対応可能である。この Half-Edge 構造を用いて表現した紙について、折る手法と切れ込みを入れる手法を確立することにより、切れ込みと折りの両立を実現した。

以降、第 2 章で Half-Edge 構造を用いた折り紙シミュレーションについて、第 3 章で切れ込みを生成するための手法を示す。第 4 章でそれを考察、評価し、最後に展望を述べる。

第 2 章

折り紙シミュレーションのためのデータ構造

折り紙シミュレーションでは、折り動作により変化していく折り紙の状態を正確に把握する必要がある。従来の折り紙シミュレーションでは、形状データとは別に折り紙の状態を保存するという独自のデータ構造により折り紙の形状把握を実現している。しかし従来のデータ構造は折り動作による変形のみを想定して作られているため、切れ込み作成を目的とする本研究では用いることが出来ない。

そこで本研究では、一般の 3D モデルを表現する汎用的なデータ構造の一つである Half-Edge 構造を用いて折り紙モデルを表現し、Half-Edge 構造の各要素が保持するデータから折り紙の形状把握を実現した。本章では、本研究で作成した折り紙シミュレーションに用いたデータ構造である Half-Edge 構造について述べ、Half-Edge 構造を用いた形状把握と折り動作について記す。なお、本章では各頂点の位置ベクトルを、その頂点の記号をボールド体で表記するものとする。

2.1 Half-Edge 構造

本研究では、折り紙を構成する頂点や辺、面データを格納するためのデータ構造として、Half-Edge 構造を用いる。Half-Edge 構造は Weiler, Mäntylä が提案した、

データの記憶容量やアクセス効率に優れたデータ構造である [10][11]。Half-Edge 構造では、「頂点」「稜線」「半稜線」「ループ」という 4 種類の要素により形状を構成する。三角形ポリゴンを Half-Edge 構造で表現した例を図 2.1 に示す。図中の V_1, V_2, V_3 が頂点、 E_1, E_2, E_3 が稜線、 $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ が半稜線、 L_1 がループである。各要素の解説を以下に述べる。

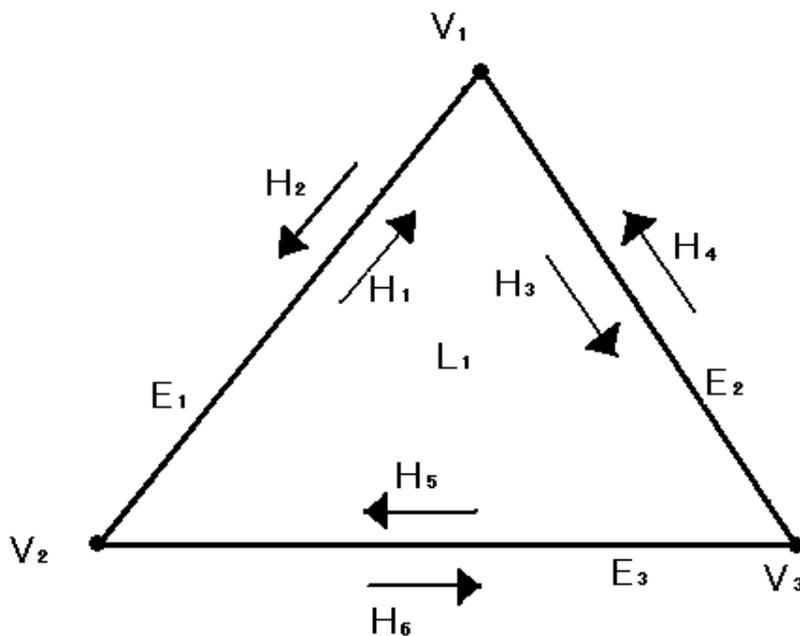


図 2.1: Half-Edge 構造の各要素

2.1.1 頂点

形状中の頂点を表す。単独で存在する場合と稜線の端点となる場合があるが、折り紙シミュレーションにおいては稜線の端点としてのみ存在する。Half-Edge 構造では、頂点データに頂点座標値と自身を始点とする半稜線一本を保持データとして持つ。

2.1.2 稜線

形状中の面同士の境界線を表す。必ず両端点に頂点があり、それぞれを始点とする半稜線を一本ずつ持つ。稜線と半稜線は親子関係を持ち、稜線は自身の両側の半稜線の子とする。Half-Edge 構造では、稜線データに2つの子半稜線を保持データとして持つ。

2.1.3 半稜線

すべての稜線に二本ずつ属している要素で、稜線の端点のうちの片方を始点とする。Half-Edge 構造では、親稜線、始点の頂点、自身の前後に位置する半稜線、自身が属するループを保持データとして持つ。

2.1.4 ループ

形状中の面を表す。複数の半稜線の連結によって構成されている。Half-Edge 構造では、ループデータに自身を構成する半稜線のうちの一本を保持データとして持つ。

このように、各要素が他要素のデータを保持しているので、どのような変形があっても要素間のデータ参照を行うことができる。

2.2 Half-Edge 構造を用いた折り動作

折り紙シミュレーションでは、変形を行うたびに頂点や面情報を検索する必要がある。以下に本シミュレーションにおける頂点や面情報を検索する必要がある状況と、Half-Edge 構造を用いたデータ検索方法について記す。なお、本シミュレーションでは、紙を多角形平面で表現し、その多角形平面を分割、回転することにより折り動作を表現する。

2.2.1 基本的な折り動作の場合

紙の折り方の指定方法は次の通りである。まず、紙を構成する頂点の中から、紙を折った時に移動する頂点を 1 つ選ぶ。そして、選んだ頂点が紙を折った後に到達する移動後の座標を指定する。紙を折る動作は次のように行なう。まず、選択した頂点の移動前後の座標から折れ線の位置を決定する。次に、紙を構成している面を折れ線を境界として分割する。最後に、分割によって作成した面の内、移動する頂点を含む面を折れ線を軸に回転する。図 2.2 は頂点 V_1 の移動先を A の位置に指定し、折れ線を境界として面を分割した例である。折れ線の端点として頂点 V_3, V_4 を追加し、 V_1, V_2, V_4, V_3 の順に頂点を結ぶループ L_1 と V_3, V_4, V_5, V_6 の順に頂点を結ぶループ L_2 の二つのループに分割した。

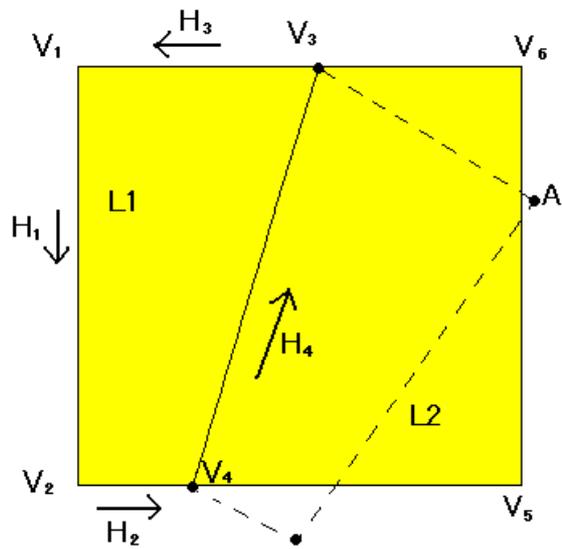


図 2.2: 頂点 V_1 の移動先を V_1' に指定した図

頂点 V_1 は保持データとして、自身を始点とする半稜線 H_1 を持つ。半稜線は保持データとして、自身の前後に接続する半稜線をもつので、 H_1 から H_2 、 H_3 、 H_4 を検索できる。さらに H_2 、 H_3 、 H_4 の始点にある頂点 V_2 、 V_3 、 V_4 が分かるので、これらの頂点を折れ線を軸に 180 度回転することで折り動作を行うことができる。

2.2.2 多重折りの場合

折り紙シミュレーションにおいて、既に幾度か折られた紙を対象とするとき、面同士の重なりや接続の関係から 1 回の折り動作で複数の面が同時に回転する場合があります。この折り動作のことを『多重折り』と呼ぶ。図 2.3 に多重折りが発生する状況の一例を示す。

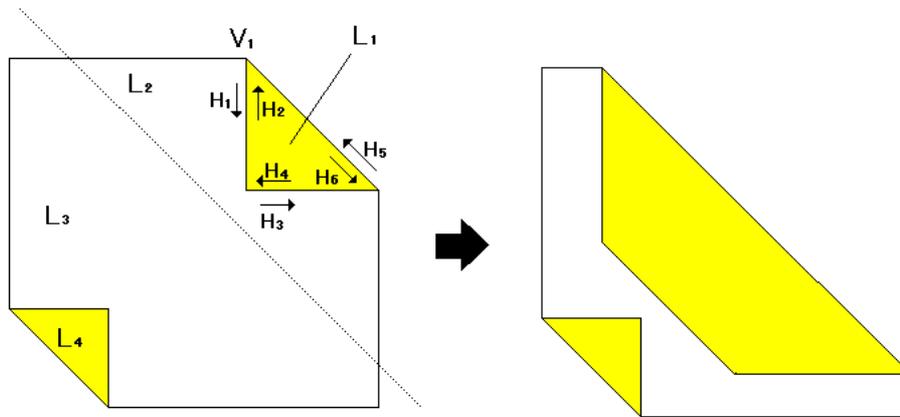


図 2.3: 多重折りが発生する状況

頂点 V_1 を移動頂点とする折り動作において、面 L_2 は L_1 の移動に伴い一部分だけ一緒に移動するが、 L_3 、 L_4 はまったく移動しない。このように、多重折りが発生する場合には、一緒に移動する面を検索する必要がある。

次に、一緒に移動する面を Half-Edge 構造を用いて検索する方法を記す。Half-Edge 構造を用いてデータ検索を行う場合は、以下の手順で移動面検索を行う。

1. 2.2.1 の手順で移動する面に含まれる半稜線 (図 2.3, H_2 , H_4 , H_6) をすべて検索する。
2. 半稜線の保持データから親稜線を検索し、親稜線の保持データから対になる半稜線 (図 2.3, H_1 , H_3 , H_5) を検索する。
3. 対になる半稜線の保持データを検索し、面に属しているか確認する。折れ線部分以外の半稜線が面に属している場合 (図 2.3, H_5) は、その半稜線が属している面 (図 2.3, L_2) は移動面になる。

上記の手順により検索した複数の移動面を、2.2.1 の方法で回転することで多重折りを行うことが出来る。

第 3 章

切れ込み部分の表現

本章では、本研究の目的である紙に切れ込みを入れるための手法について述べる。以降、本研究で提案する切れ込みの作成方法と、切れ込みを入れることにより発生する描画時の問題点の解決法について述べる。なお、本章では各頂点の位置ベクトルを、その頂点の記号をボールド体で表記するものとする。

3.1 切れ込みの作成方法

本研究の折り紙シミュレーションでは、任意の 2 点を指定することにより切れ込みを作成する位置を指定し、その位置に以降で述べる手法を用いて切れ込みを作成する。その際、切れ込みを作成した後も 2.2 で述べた要素間のデータ検索を行えるようにし、折り動作との両立を実現する。また、切れ込み部分の間隔を調節することにより、見た目の分かりやすさと操作性の向上を図る。以下に本研究で用いた切れ込みを作成する手法を述べる。

1) 折り紙の辺と切れ込み作成用の線分の交点に頂点を作成し、辺を分割する。

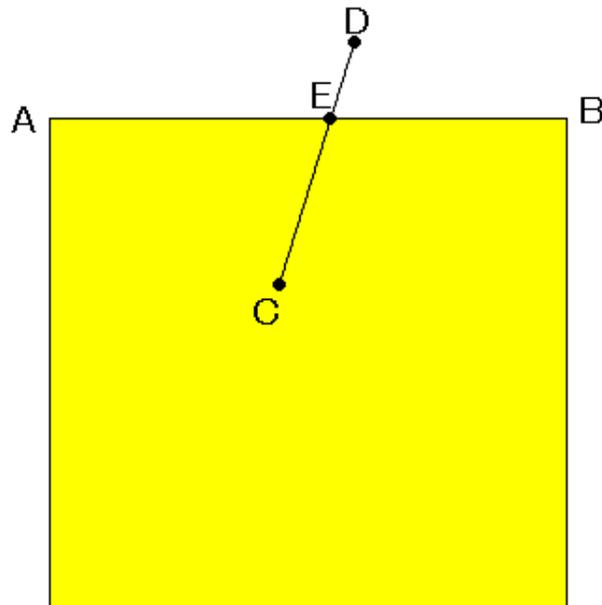


図 3.1: 切れ込みを作成する場所を指定する

切れ込みを入れる位置の指定方法は次の通りである。まず、紙を構成する面内において、任意の点 C を配置する。次に面の外部に任意の点 D を配置する。この 2 点を結ぶ線分 CD 上に切れ込みを作成する。切れ込みの作成方法は次の通りである。まず、折り紙の輪郭を構成する稜線の内 CD と交差する稜線を AB とする。両者の交点上に頂点 E を作成し、稜線 AB を稜線 AE と稜線 EB に分割する。図 3.1 は切れ込みを作成する場所を指定し、折り紙の輪郭を構成する稜線 AB 上に新たに頂点 C を作成したものである。

2) 切れ込み部分の間隔を設定する

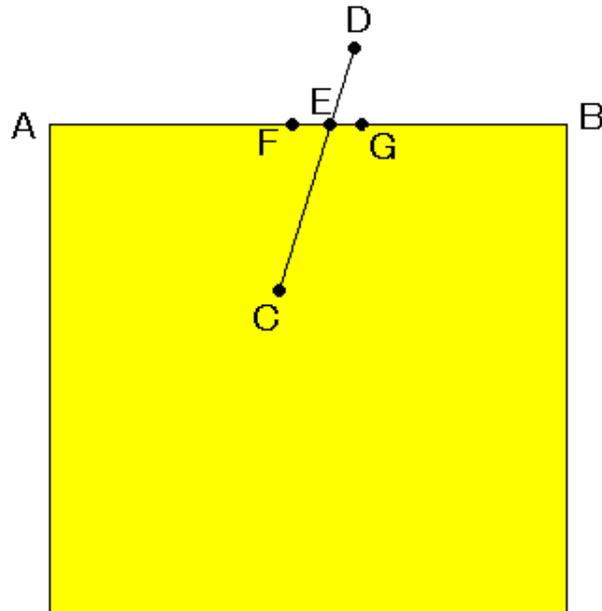


図 3.2: 切れ込みの間隔を指定する

切れ込み部分の間隔を指定する方法は次の通りである。折り紙の輪郭を構成する稜線の内頂点 E を含む稜線 AE と EB 上に新たに頂点 F、G を作成する。そして、稜線 AE を稜線 AF と稜線 FE に、稜線 EB を稜線 EG と稜線 GB に分割する。F と G の間隔が切れ込み部分の間隔になる。頂点 F、G はそれぞれ以下の式的位置に作成する。 α には 0 に近い値を入力し、切れ込みの間隔を広く空けたい場合には α の値を大きくする。図 3.2 は切れ込み部分に間隔を空けるための頂点 F、G を作成したものである。

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \delta\mathbf{A} + (1 - \delta)\mathbf{E} \\ \mathbf{G} = \delta\mathbf{B} + (1 - \delta)\mathbf{E} \end{cases} \quad (3.1)$$

3) 頂点を移動することで切れ込み部分を表現する

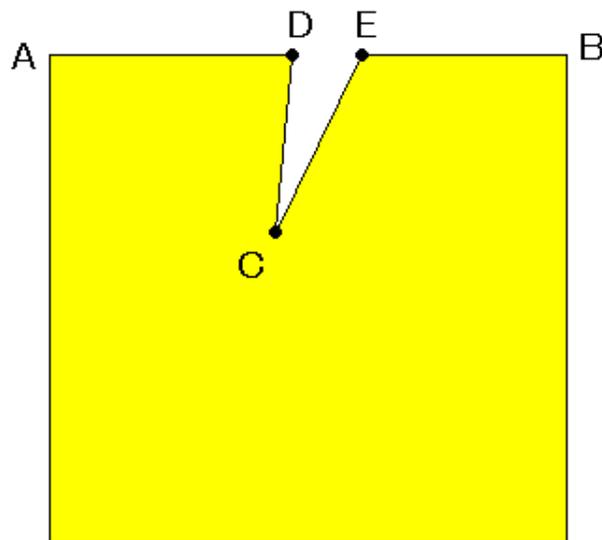


図 3.3: 頂点を移動して切れ込み部分を完成させる

頂点 E を C の位置に移動する。これにより、切れ込みを入れるために指定した場所に、一定の間隔を空けた切れ込みを作成することが出来る。図 3.3 は頂点 E を移動し、切れ込み部分を表現したものである。

上記の手法を用いることで、ループ内の半稜線の連結を途切れさせることなく切れ込み部分を作成することが出来る。そのため、切れ込みが入ったあとでも 2.2 で述べたデータ検索が行えるので、折り動作と切れ込み作成の両立を実現出来る。

3.2 非凸多角形の描画時の問題と解決方法

従来の折り紙シミュレーションは、折りの動作のみで変形を行うので、作成される面はすべて凸多角形に分類される。しかし、3.1 で示した方法により切れ込みを入れると、180 度以上の角を持つ面、つまり非凸多角形が作成されてしまう。OpenGL を始めとする 3D グラフィックソフトは、非凸多角形の描画に対応していないものが多いので、そのまま描画すると何も無い部分まで描画してしまうことや存在しない稜線が描画されてしまうことがあるという問題が発生する [12]。そこで本研究では、以下に示す手順 [13] を用いて全ての面を三角形に分割することにより、描画時に発生する問題を解決した。

3.2.1 y 単調な多角形への分割

多角形 P を三角形分割するには、最初に P を y 単調な部分に分割し、次にそれらの部分を三角形分割する必要がある。 y 単調な多角形とは、最も上にある頂点から最も下にある頂点まで、左右どちらの辺をたどるときでも、一度も上がることなく常に下向きか水平に進むことの出来る多角形のことを指す。また、点 p の x 成分を p_x 、点 p の y 成分を p_y 、点 q の x 成分を q_x 、点 q の y 成分を q_y と定義して p と q の上下関係を比較するとき、点 p が別の点 q より下にあるのは、 $p_y < q_y$ か $p_y = q_y$ かつ $p_x > q_x$ が成り立つときで、点 p が別の点 q より上にあるのは、 $p_y > q_y$ か $p_y = q_y$ かつ $p_x < q_x$ が成り立つときであると定義する。なお、この定義上の上下関係は、平面を時計回りの方向に少しだけ回転させ、どの 2 点も同じ y 座標を持たないようにしたときの上下関係と同じである。

多角形を y 単調な多角形に分割するには以下に述べる手法を用いる。

1. 多角形の内角が 180 度より大きい小さいかを判定する

多角形 P に含まれる全ての頂点の内角に対し、180 度より大きい小さいかの判定を行う。多角形 P に含まれる頂点列を $p_i (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$ 、各頂点を結ぶベクトルを $\mathbf{v}_i = \overrightarrow{p_{i-1}p_i} (i = 1, 2, \dots, n)$ とする。図 3.4 は多角形に含ま

れる頂点とベクトルを上記のように分類したものである。 p_2 の内角を判定するには、まず p_2 に接続する 2 つのベクトルの外積 $v_2 \times v_3$ を求める。次に、 p_2 に隣接する頂点 p_1 、 p_3 でも同様に外積 $v_1 \times v_2$ 、 $v_3 \times v_4$ を求める。その後、 $v_2 \times v_3$ と $v_1 \times v_2$ 、 $v_2 \times v_3$ と $v_3 \times v_4$ でそれぞれ内積を求める。2 つの内積がどちらとも負の値だったとき p_2 の内角は 180 度より大きくなり、それ以外の場合は 180 度より小さくなる。

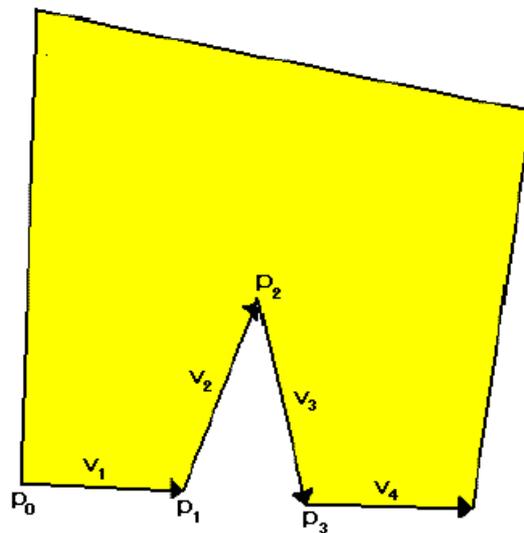


図 3.4: 多角形を構成する頂点とベクトル

2. 頂点を 5 種類に分類する

多角形 P に含まれる全ての頂点を、以下に記す条件に従い出発点 (start vertex)、分離点 (split vertex)、最終点 (end vertex)、統合点 (merge vertex)、普通の頂点 (regular vertex) の 5 種類に分類する。図 3.5 は多角形に含まれる頂点を条件に従い分類したものである。なお、ここでは分類の対象になる頂点を p とする。

- 頂点 p の隣接頂点がいずれも下にあり、 p の内角が 180 度より小さいとき、 p は出発点である。

- 頂点 p の隣接頂点がいずれも下にあり、 p の内角が 180 度より大きいとき、 p は分離点である。
- 頂点 p の隣接頂点がいずれも上にあり、 p の内角が 180 度より小さいとき、 p は最終点である。
- 頂点 p の隣接頂点がいずれも上にあり、 p の内角が 180 度より大きいとき、 p は結合点である。
- 頂点 p の一方の隣接頂点が p より上にあり、他方は p より下にあるとき、 p は普通の頂点である。

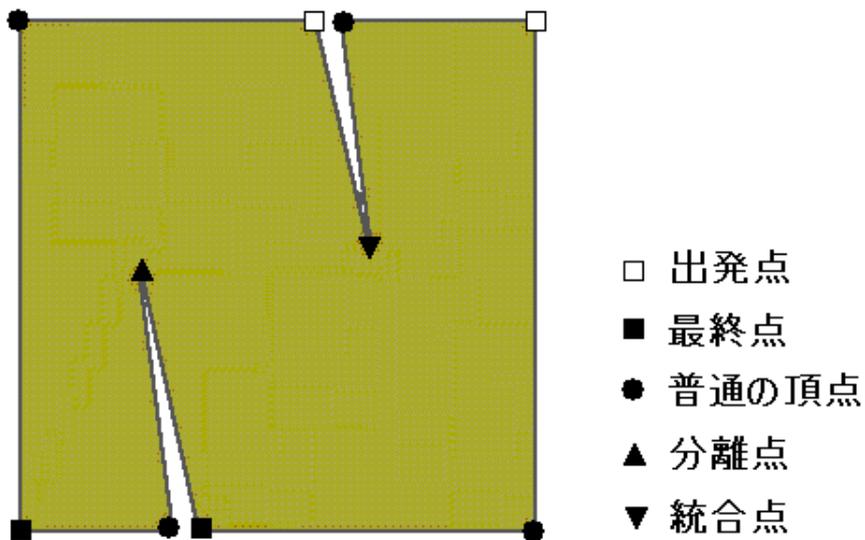


図 3.5: 非凸多角形に含まれる頂点を 5 種類に分類した図

3. 分離点、統合点を取り除く多角形が y 単調であるとき、分離点と統合点は存在しない。すなわち、分離点と統合点が無くなるように分割することで多角形を y 単調な多角形に分割することが出来るのである。分離点を取り除くに

は、分離点のすぐ左側にある辺を探し、その辺の両端点のうち上にある頂点と分離点を結ぶ辺で面を分割すればよい。また、統合点を取り除くには、統合点のすぐ左側にある辺を探し、その辺の両端点のうち下にある頂点と統合点を結ぶ辺で面を分割すればよい。図 3.6 は多角形を上記の方法で分割し、分離点と結合点を取り除いたものである。

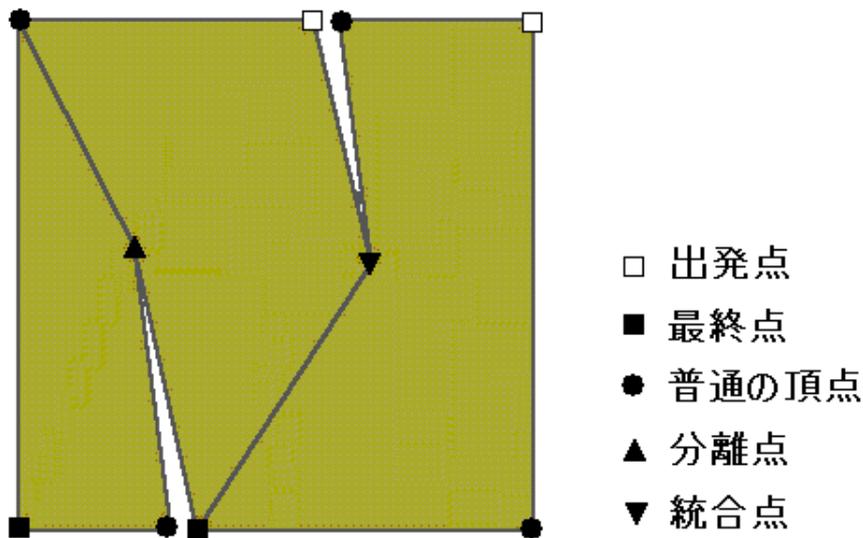


図 3.6: 分離点、統合点で多角形を y 単調な多角形に分割する

3.2.2 y 単調な多角形の三角形分割

多角形を y 単調な多角形に分割した後、以下に述べる手法を用いてすべての y 単調な多角形を三角形分割する。

1. y 単調な多角形 Q の頂点から 3 種類の頂点列を作成する

多角形 Q の頂点集合から、 y 座標値の降順にソートした頂点列 A と、もっとも上にある頂点からもっとも下にある頂点までを左からたどる順に格納し

た頂点列 B 、もっとも上にある頂点からもっとも下にある頂点までを右からたどる順に格納した頂点列 C の3種類の頂点列を用意する。図 3.7 に多角形に含まれる頂点を、頂点列 A 、 B 、 C に分類したものを記す。

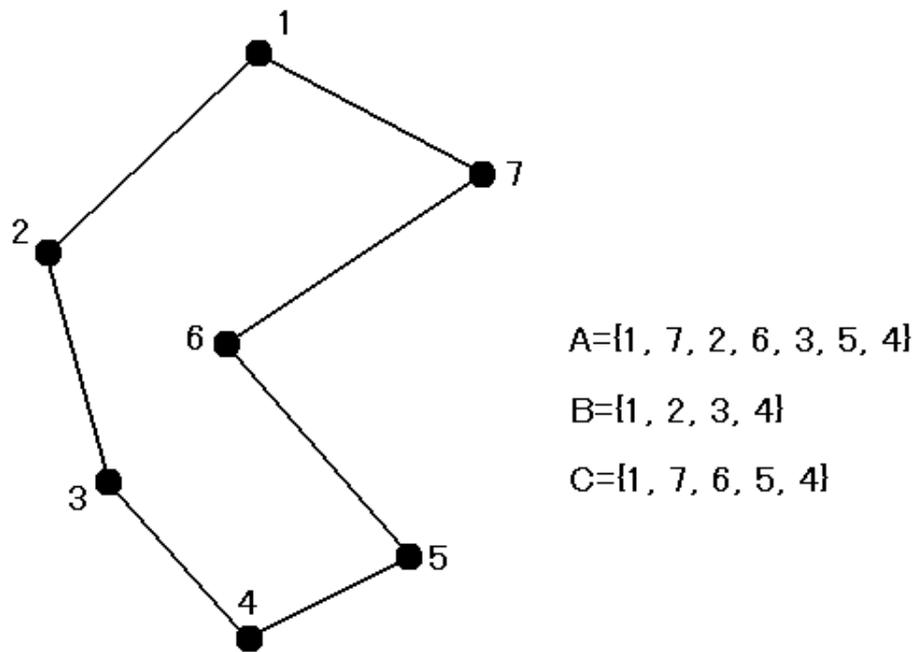


図 3.7: 多角形の各頂点を3つの頂点列に分類したもの

2. 3種類の頂点列を用いて分割するための頂点を決める

頂点列 A の1番目の頂点を A_1 、2番目の頂点を A_2 、3番目の頂点を A_3 、頂点列 B の2番目の頂点を B_2 、頂点列 C の2番目の頂点を C_2 とする。 A_2 の位置の内角が180度より大きい場合と、 A_2 、 A_3 が頂点列 B 、 C に一つずつ属している場合は、 B_2 と C_2 を結ぶ辺を新たに作成して多角形 Q を分割する。図 3.8 に B_2 と C_2 を結ぶ辺を新たに作成して多角形 Q を分割する状況の一例を示す。

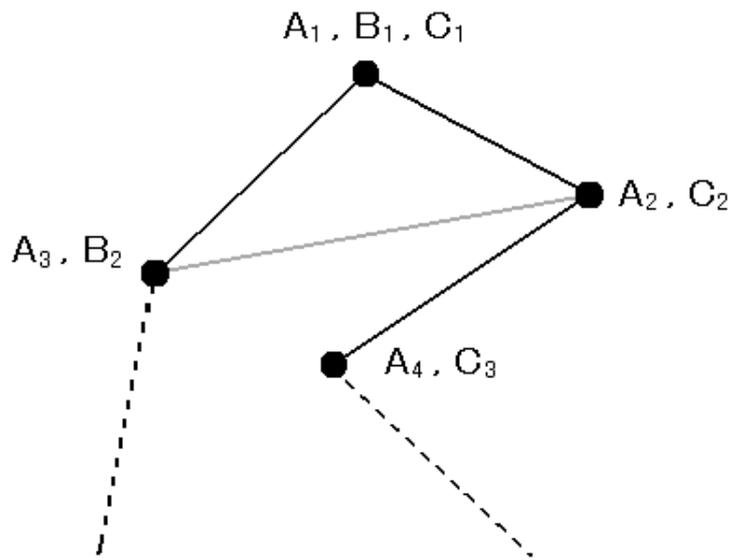


図 3.8: 上から 2 番目と 3 番目にある頂点で多角形を分割する場合

A_2 の位置の内角が 180 度より小さく、かつ A_3, A_3 が頂点列 B または C に二つとも属している場合は、 A_1 と A_3 を結ぶ辺を新たに作成して多角形 Q を分割する。図 3.9 に A_1 と A_3 を結ぶ辺を新たに作成して多角形 Q を分割する状況の一例を示す。

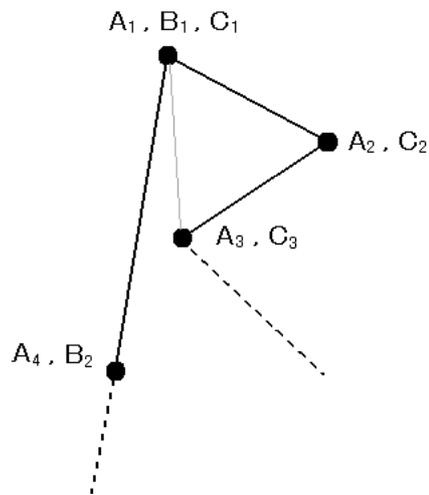


図 3.9: 上から 1 番目と 3 番目にある頂点で多角形を分割する場合

3. 三角形分割が終わるまで繰り返す

多角形 Q が n 角形の場合、上記の処理を $n-3$ 回繰り返すことにより三角形分割が完了する。この三角形分割の手法は、あらゆる多角形に適応できるので、描画時の問題は解決できた。図 3.10 に多角形を手順に従い三角形分割したものを示す。

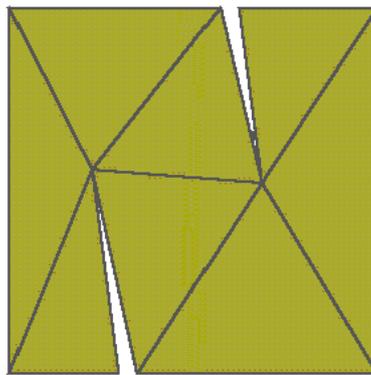


図 3.10: 多角形を三角形に分割した図

第 4 章

結果と考察

4.1 結果

3章で述べた切れ込み表現の作成方法と非凸多角形の描画方法を実装した折り紙シミュレーションを、3D グラフィックツールキットである FK System を用いて開発した。図 4.1 は本シミュレーション上で、四隅に切れ込みを入れた折り紙モデルである。

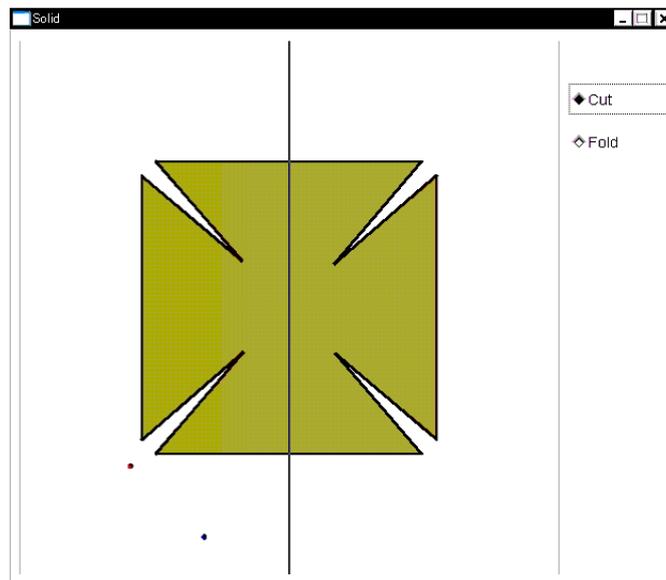


図 4.1: 四隅に切れ込みを入れた折り紙モデル

以降図 4.2、4.3、4.4 は本シミュレーションで作成した折り紙作品「手裏剣」が出来るまでの各段階である。切れ込みを入れた部分でも従来の折り紙シミュレーションと同様の折り動作を行えることを確認できた。

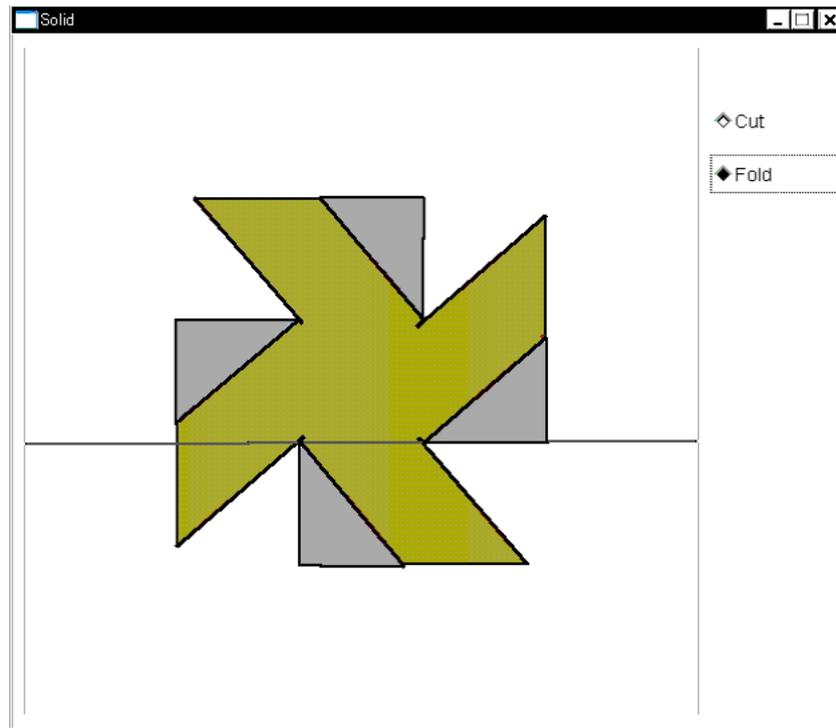


図 4.2: 四隅の切れ込み部分の片側だけ折る

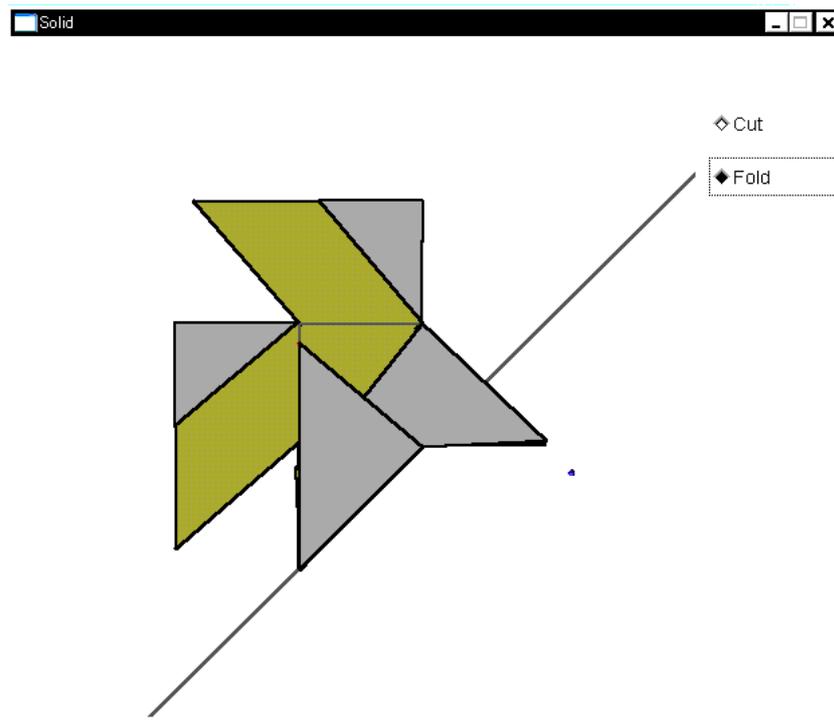


図 4.3: 折られていない切れ込み部分を順番に折る

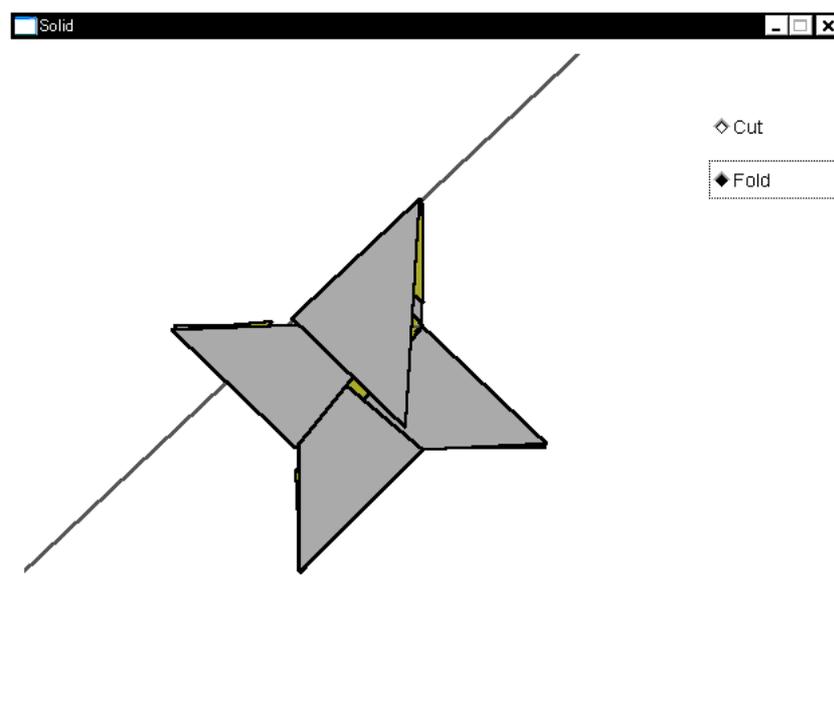


図 4.4: 完成図

4.2 考察

本研究では切れ込みを作成する手法を提案した結果、折り紙シミュレーション上で紙の切れ込みを表現できた。また、切れ込みを作成することで発生する非凸多角形を複数の三角形に分割する手法を実装することにより、描画時の問題を解決できた。そして、切れ込みを作成することで、従来の折り紙シミュレーションでは作成出来なかった形状を作成することができた。これらの点から、切れ込み表現を加えた折り紙シミュレーションを考案し、より多くの作品を作ることが出来るようにする、という本研究の目的を達することが出来たと言える。

4.3 今後の展望

現時点の実装では、紙に切れ込みを入れることが出来た。しかし、切れ込みを入れられる場所が紙の外周に限定されており、面の内部に切れ込みを入れることが出来ていない。今後は、面の内部に切れ込みを作成できる手法を提案し、図 4.5 のような形状を作ることの出来る折り紙シミュレーションを開発していきたい。

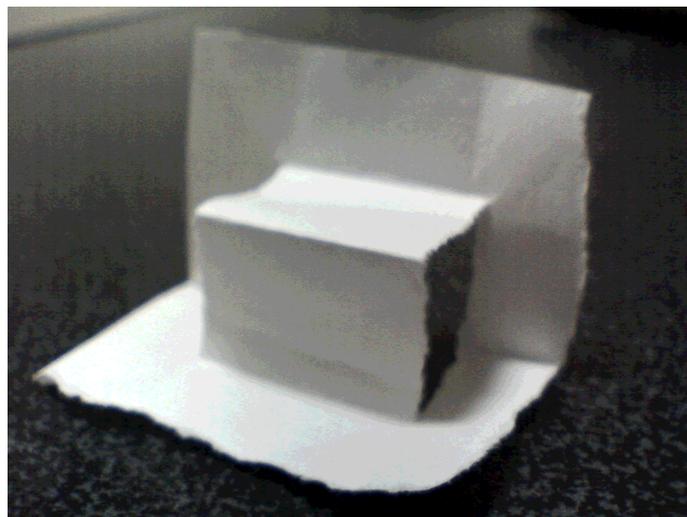


図 4.5: 面の内部に切れ込みを入れて作った形状

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導をいただいた渡辺 大地講師、和田 篤氏、また研究に関するさまざまな知識を提供していただいた研究室の方々、そして研究生生活を精神面で支えてくれた家族と友人一同に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] URBAN DEMIGRAPHICS , “ OPERATION PEACE CRANE ” , http://www.e22.com/peacecrane/index_j.htm
- [2] “ 紙を折るプログラム ” , <http://homepage.mac.com/jackyravo256/paso26.html>
- [3] 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>
- [4] 宮崎慎也 , 安田孝美 , 横井茂樹 , 鳥脇純一郎 , “ 仮想空間における折り紙の対話型操作の実現 ” , 情報処理学会論文誌 , vol.34(9) , pp.1994-2001 , 1993
- [5] 横山卓弘 , 高井昌彰 , “ 厚さを持った折り紙シミュレーションとその評価 ” , 情報処理学会報告 No.2000-CG-101
- [6] 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
- [7] 紙館 島勇 , “ 和紙 Art Gallery ” , <http://www.shimayu.co.jp/g-kana4.php>
- [8] 川口圭司 , “ 斜め45度折りによる建築物 ” , <http://www.venus.dti.ne.jp/kpd/html/kentiku.html>
- [9] 渡辺大地 , “ FK Ver 2.7.12 システムユーザーズマニュアル ” , http://www.teu.ac.jp/aqua/~earth/FK/Document/FK_2_7_12.pdf

- [10] M.Mäntylä ,“ An Introduction to Solid Modeling ”, Computer Science Press ,
MaryLand , 1988
- [11] K.J.Weiler, “ Edge-based data structures for solid modeling in curved-surface
environments ”, IEEE Computer Graphics and Applications , 1985
- [12] OpneGL Architecture Review Board “ OpenGL Reference Manual 日本語
版 ”, 1993.11
- [13] M. ドバーグ , M. ファン クリベルド , M. オーバマーズ , O. シュワルツコッ
プ , 浅野哲夫訳 , “ コンピュータ・ジオメトリ ”, 近代科学社 , 2000