

修士論文

平成 17 年度 (2005)

切り起こし 180 度型折り紙建築の
設計支援に関する研究

東京工科大学大学院

バイオ・情報メディア研究科 メディアサイエンス専攻

藤原 大三郎

修士論文

平成 17 年度 (2005)

切り起こし180度型折り紙建築の 設計支援に関する研究

指導教員 若林 尚樹 教授, 渡辺 大地 講師

東京工科大学大学院

バイオ・情報メディア研究科 メディアサイエンス専攻

藤原 大三郎

論文の要旨

論文題目	切り起こし180度型折り紙建築の 設計支援に関する研究
執筆者氏名	藤原 大三郎
指導教員	若林 尚樹 教授, 渡辺 大地 講師
キーワード	CAD 展開図 折り紙建築 ポップアップカード 切り起こし ポリゴンモデル 幅優先探索
[要旨]	<p>折り紙建築 (Origamic Architecture) とは、二つ折りの紙を開くと形状が起き上がるペーパークラフトである。折り紙建築という言葉は当初建築物の表現に利用されていたことに由来するが、現在では建築物に限らずあらゆる物を表現対象としている。現在グリーティングカードや個人の趣味などの用途で利用されており、様々な展開図を掲載した型紙集が数多く存在する。</p> <p>折り紙建築には様々な形状表現手法が存在し、その中の1つに切り起こし180度型と呼ばれるものがある。切り起こし180度型の折り紙建築は二つ折りにしても厚みが増さず、他の手法より収納性に優れている。その一方で、切り起こし180度型は折り紙建築の中で特に設計が困難な手法である。設計には図学の知識と経験が必要であり、熟練者が試行錯誤しながら設計しているのが実状である。折り紙建築の設計を支援する研究はこれまでも存在するが、切り起こし180度型に関しては研究が進んでいない。</p> <p>本研究は、切り起こし180度型折り紙建築の設計を支援することを目的とする。あらかじめ用意しておいた3D形状から切り起こし180度型折り紙建築の展開図を生成する手法を提案する。本手法によって展開図設計にかかる時間と試行錯誤の回数を削減でき、制作者の労力や紙のコストの削減を可能とする。本手法については実際に実装し、その有効性を確認した。</p>

A b s t r a c t

Title	Research on Computer Aided Design for cut-up 180 degree-open type Origamic Architecture
Author	Daizaburo Fujiwara
Advisor	Professor Naoki Wakabayashi , Lecturer Taichi Watanabe
Key Words	CAD Development Origamic-Architecture Pop-Up Card Cut-Up Polygon Model Breadth-First Search
[summary] <p>Origamic Architecture is a kind of paper craft. It is a folio paper and a shape inside the paper gets up when it opened. The etymology Origamic Architecture come from that it was used in expression for a real building. But now it is used in expression for every thing. Now it is used for a greeting card and a personal hobby. A lot of collections of paper patterns for Origamic Architecture which carried various development are published.</p> <p>There is various shape expression technique in Origamic Architecture. “Cut-Up 180 degree-open type” is one of the technique. Usually, when Origamic Architecture is made a folio, its thickness increases. In the case of Cut-Up 180 degree-open type, thickness does not increase even if it made a folio. It’s convenient when storing. However, Cut-Up 180 degree-open type is particularly difficult in Origamic Architecture. There is several studies to help designing of Origamic Architecture, but they can not help to design Cut-Up 180 degree-type.</p> <p>This research aims at proposing a method to support designing of Cut-Up 180 degree-open type Origamic Architecture. This research proposes a method of generating a development from objective shape. The effectiveness of this method reduced time and the number of times of trial and error, labor of a producer, and cost of paper. Proposal method was confirmed by mounting as a design supporting system.</p>	

目次

第1章	はじめに	1
第2章	切り起こし180度型折り紙建築	7
2.1	折り紙建築の分類	8
2.1.1	90度型	8
2.1.2	180度型	9
2.1.3	360度型、0度型	9
2.2	180度型における形状表現手法	11
2.2.1	断面の集合による形状表現	11
2.2.2	表面による形状表現	12
2.3	切り起こし手法	14
第3章	ポリゴンモデルからの展開図生成手法	16
3.1	切り起こし180度型折り紙建築の展開図の特徴	17
3.2	手法の概要	20
3.3	末端稜線の作成	24
3.4	固定稜線の決定	25
3.5	レベル値の付与	31
3.6	親面の決定	32
3.6.1	基本手順	32
3.6.2	隣接評価値	37
第4章	システムの実装と評価	41
4.1	設計支援システム	42
4.1.1	入力形状の配置支援	44
4.1.2	面対称形状への変換	46
4.1.3	同一平面に近い隣接面の統合	47
4.1.4	バーチャル折り紙建築	48
4.1.5	展開アニメーション	49
4.1.6	形状の4分割	50
4.2	実行結果	52

4.2.1	凸形状	52
4.2.2	非凸形状	55
4.3	評価	57
4.3.1	形状の制約	57
4.3.2	ポリゴン数の制約	59
第5章 まとめ		60
謝辞		62
参考文献		63

目 次

1.1	ポップアップカード (a) とパーツ (b)	3
1.2	折り紙建築	3
1.3	切り起こし 180 度型折り紙建築	6
2.1	90 度型折り紙建築の展開図 (a) と組み立てた様子 (b)	8
2.2	紙片の格子状組み合わせによる 180 度型折り紙建築	9
2.3	360 度折り紙建築	10
2.4	断面の集合による四角錐の表現	11
2.5	表面による四角錐の表現	12
2.6	切り起こし 180 度型折り紙建築	14
2.7	切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図	14
3.1	切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図	18
3.2	台紙からの引っ張る力による形状の起き上がり	19
3.3	親面	20
3.4	切り起こし 180 度型折り紙建築 (非面对称)	21
3.5	切り起こし 180 度型折り紙建築 (非面对称) の展開図	21
3.6	展開図の面グラフ (1)	22
3.7	展開図の面グラフ (2)	22
3.8	末端稜線の作成	24
3.9	折り目から遠い位置ほど引っ張る力が強く働く	25
3.10	ポリゴンモデル	26
3.11	固定稜線の選択	27
3.12	角度と長さによる固定稜線の決定	28
3.13	末端稜線と固定稜線が決定したポリゴンモデル (左半分)	31
3.14	レベル値の付与	31
3.15	親面の決定 (矢印は子面から親面への隣接を示す)	35
3.16	親面決定の流れ	36
3.17	隣接の連続性	38
3.18	連続性評価値	39

4.1	入力形状配置画面	44
4.2	配置に対する警告機能：形状が台紙に接触していない	45
4.3	配置に対する警告機能：形状が折り目を跨いでいない	45
4.4	面対称形状への変換	46
4.5	限りなく平面に近い隣接面の統合	47
4.6	バーチャル折り紙建築の開閉	48
4.7	展開アニメーション	49
4.8	再帰的な面の回転(赤い箇所は回転する部分)	50
4.9	2分割展開図と4分割展開図	51
4.10	四角錐	52
4.11	立方体	52
4.12	球(横置き)	53
4.13	球(縦置き)	53
4.14	半球(ポリゴン数多):元形状	54
4.15	半球(ポリゴン数多):展開図	54
4.16	V字型	55
4.17	凹みのある直方体	55
4.18	東京タワー型:元形状	56
4.19	東京タワー型:展開図	56
4.20	山折りと谷折りがぶつかる箇所	58
4.21	面の法線方向と形状の潰れ	59

第 1 章

はじめに

現在、グリーティングカードや飛び出す絵本、ノベルティグッズなど幅広い用途で、ポップアップカードと呼ばれるペーパークラフトが利用されている。ポップアップカードは、二つ折りの紙を開くと畳まれていた形状が起き上がるカードである。形状が起き上がる様子がユニークであると同時に、立体形状をコンパクトに折り畳むことが出来るというメリットも持ち合わせている。ポップアップカードは個人のホビーとしても人気が高い。ポップアップカードの様々な仕組みを例示し解説する書籍 [1] が存在することからも、個人で制作したいという需要がうかがい知れる。

ポップアップカードの1つのジャンルとして折り紙建築 (Origamic Architecture) が存在する。折り紙建築に明確な定義はないが、形状の表現方法に特色がある。図 1.1(a) は一般的なポップアップカードの例であり、図 1.1(b) はそのパーツである。表現したい形状の輪郭を切り抜いた書き割りのようなパーツを用いることが多い。その中で折り紙建築は、紙に切れ目を入れたり折り曲げたりしてボリュームのある表現をする傾向がある。図 1.2は折り紙建築の一例である。できるだけ書き割りを使わず、綺麗に忠実に形状を表現することに重きを置いている。

折り紙建築は開く角度により4つの型に分類できる [2]。

90 度型: 90 度を開いたときに形状が起き上がるタイプ

180 度型: 180 度を開いたときに形状が起き上がるタイプ

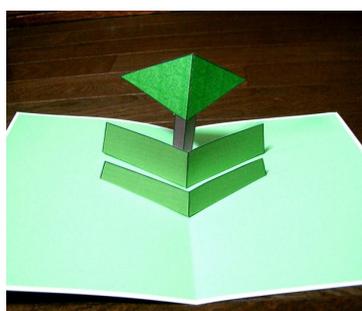
360 度型: 360 度を開いたときに形状が起き上がるタイプ

0 度型: 紙の重なりで立体感を表現するタイプ

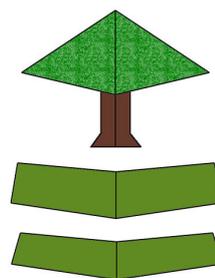
また、形状の表現手法も様々であり、一枚の紙で形状を表現する手法や、複数のパーツを組み合わせて形状を表現する手法が存在する。それぞれの型や形状表現手法については2章で詳しく述べる。

折り紙建築という名前は、建築家である茶谷正洋氏が、建築物をポップアップで表現するために考案したものに命名した [3] ことに由来する。現在では建築物に限

らずあらゆる物を表現対象とし、国内に限らず海外でも広く親しまれている。様々な展開図を掲載した型紙集 [4][5][6][7][8] が数多く存在する。



(a)



(b)

図 1.1: ポップアップカード (a) とパーツ (b)

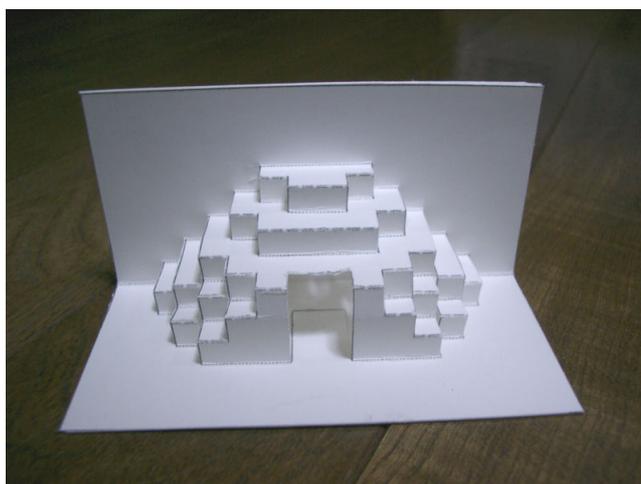


図 1.2: 折り紙建築

ユニークな特徴を持ち人気のある折り紙建築であるが、設計には図学の知識と経験、さらに、多くの試行錯誤が必要である。折り紙建築制作には、ペーパークラフト設計の難しさとポップアップカード設計の難しさ、すなわち、形状を形作ることと形状を立てることの2つの難しさが伴う。折り紙建築を制作するには、まず展開図を設計する必要がある。一般的にペーパークラフトの展開図設計は難易度が高く、従来は熟練者の手によって行われてきた [9]。まず、形状の立面図から手作業で立体を起こし、紙片の切り貼りの連続の後に最終的な形状を決定する。その形状を再び切り開き、展開図を作成する。折り紙建築の場合は展開図作成の際、台紙を開くだけで折り畳まれていた形状が起き上がらなければならないという制約が加わるため、通常のペーパークラフトよりも更に試行錯誤が必要となる。図学の知識や経験の乏しい一般の人であればなおさらである。折り紙建築を手軽に設計するために何らかの支援が必要である。

これまでにペーパークラフト、ポップアップカードそれぞれについて設計支援の研究が存在し、折り紙建築の設計支援に関する研究も存在する。ペーパークラフトの展開図生成に関しては、ポリゴンモデルから展開図を自動生成する手法 [10][11][12] がこれまでに存在する。これらの手法は、制作時の労力や紙面のコストが出来るだけ小さい展開図の効率的生成を実現している。

ポップアップカードに関して Glassner [13][14] は、対話的にポップアップカードを作成する手法と、開閉する様子アニメーション表示の手法を提案している。図 1.1 で示したような、複数の板状パーツを V 字型に曲げて台紙に貼り付ける典型的なポップアップカードを対象とした手法である。

三谷は、90 度に台紙を開いたときに形状が起き上がる、90 度型と呼ばれる折り紙建築を対象とした設計支援研究 [15][16] を行っている。90 度型折り紙建築をボクセルで表現することで、設計、及び展開図の作成を効率的に行う方法、さらに平面多角形の集合を用いることで自由度の高い形状の設計を支援する方法を提案している。その研究成果は現在、多摩ソフトウェア有限会社が「ポップアップカードデザイナー [17]」「ポップアップカードデザイナー PRO [18]」として商品化して

いる。

さらに三谷は 180 度型折り紙建築に関しても設計支援研究 [19] を行っている。180 度型の中でも、紙製パーツを格子状に組み合わせることで形状を表現する手法を対象としている。既存のポリゴンモデルから断面形状を取得することで、格子状に組み合わせるパーツの生成を実現している。

180 度型には他にも様々な形状表現手法が存在し、設計支援の余地が多く残されている。支援研究の進んでいない手法の 1 つに、切り起こし 180 度型と呼ばれるものがある。通常、折り紙建築は二つ折りにしたとき厚みが出るのだが、切り起こし 180 度型の折り紙建築は二つ折りにしても厚みが増さず、収納性に優れている。これは大きなメリットであるが、切り起こし 180 度型は折り紙建築の中で特に設計が困難な手法である。設計において図学の知識と経験が要求されるため、熟練者の試行錯誤によって設計されているのが実状である。

本研究は、180 度型折り紙建築の中でも切り起こし [20] と呼ばれる手法を対象として、設計を支援することを目的とする。図 1.3 は切り起こし手法を用いた 180 度型折り紙建築である。切り起こし手法は 1 枚の紙で形状を表現する手法であり、畳んだときに厚みが増さないという特長がある。反面、切り起こし手法の折り紙建築は展開図の設計が非常に困難である。本研究は、あらかじめ与えられた 3D 形状から切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図を自動生成する手法を提案する。具体的には、表現したい形状をポリゴンモデルとして用意しておくこととし、切り起こし 180 度型折り紙建築で表現できるように展開する手法を提案する。本手法によって展開図設計にかかる時間と試行錯誤の回数を削減でき、制作者の労力や紙のコストの削減を可能とする。本手法については実際に実装し、その有効性を確認した。

論文の構成

本論文は、本章を含めて全 5 章からなる。

第 2 章では、折り紙建築の様々な型と形状表現手法を紹介し、切り起こし 180 度

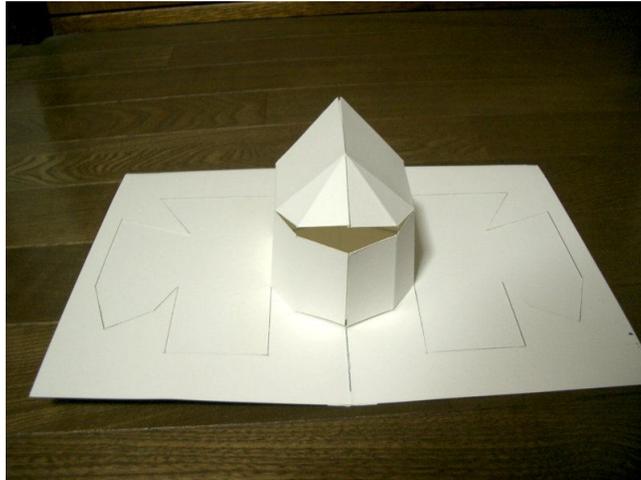


図 1.3: 切り起こし 180 度型折り紙建築

型折り紙建築の位置づけを明確化する。第 3 章では、切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図の特徴と、ポリゴンモデルから切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図を作り出す手法について詳細を述べる。第 4 章では、提案手法を元に実装した展開図設計支援システムについて述べ、評価を行う。最後に、第 5 章で本研究の結果によって得られる結論、および、今後の課題と展望をまとめる。

第 2 章

切り起こし180度型折り紙建築

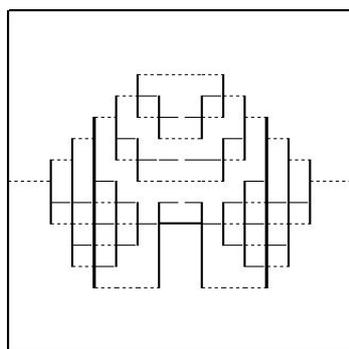
本研究は、切り起こしと呼ばれる手法を用いた 180 度型折り紙建築を研究対象とする。本章では、折り紙建築の様々な型と形状表現手法を紹介し、切り起こし 180 度型折り紙建築の位置づけを明確化する。2.1 節では折り紙建築の型について、2.2 節では 180 度型折り紙建築における形状表現の手法について、2.3 節では切り起こし 180 度型折り紙建築について述べる。

2.1 折り紙建築の分類

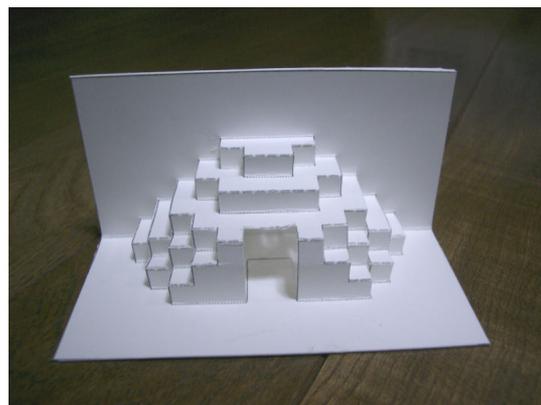
折り紙建築は開く角度により 90 度型、180 度型、360 度型、0 度型に分類できる [2]。

2.1.1 90 度型

90 度型折り紙建築は、90 度を開いたときに形状が起き上がる折り紙建築である。制作にかかる手間が小さく、一枚の紙に切れ目と折り目を入れ、二つ折りにするだけで出来上がる。180 度まで開くと元の 1 枚の紙に戻る。制作が容易である反面、形状の手前方向および上方向からしか鑑賞できない。図 2.1 は 90 度型折り紙建築の例である。展開図 (a) を組み立てると (b) のようになる。



(a)



(b)

図 2.1: 90 度型折り紙建築の展開図 (a) と組み立てた様子 (b)

2.1.2 180度型

180度型折り紙建築は、180度まで開いたときに形状が起き上がる折り紙建築である。90度型と異なり形状の底面以外の全方向から鑑賞できる。180度型折り紙建築には、形状を表現するのに様々な手法が存在する。図2.2の折り紙建築は、紙製の部品を格子状に組み合わせることで形状を表現している。180度型折り紙建築の様々な手法については次節で述べる。

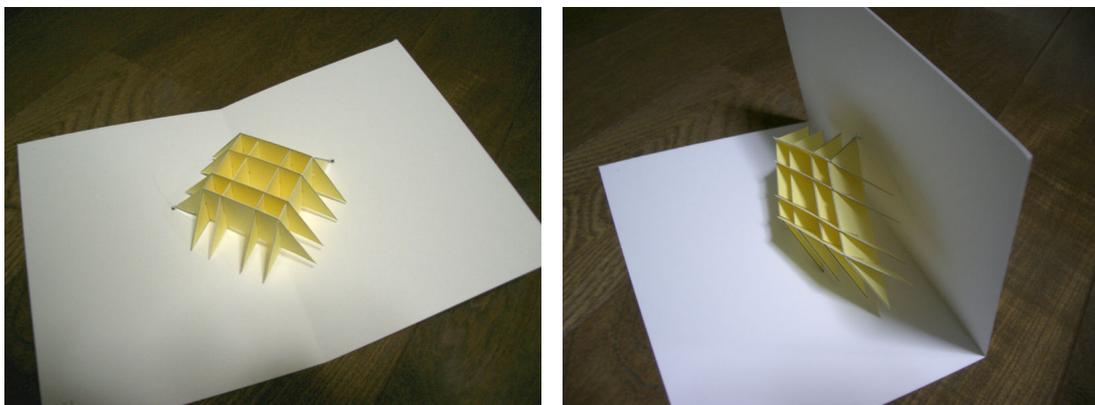
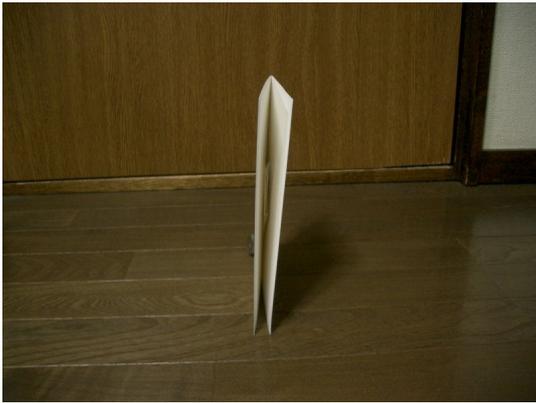


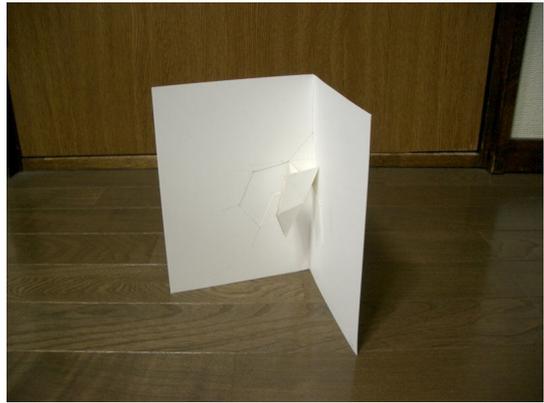
図 2.2: 紙片の格子状組み合わせによる 180 度型折り紙建築

2.1.3 360度型、0度型

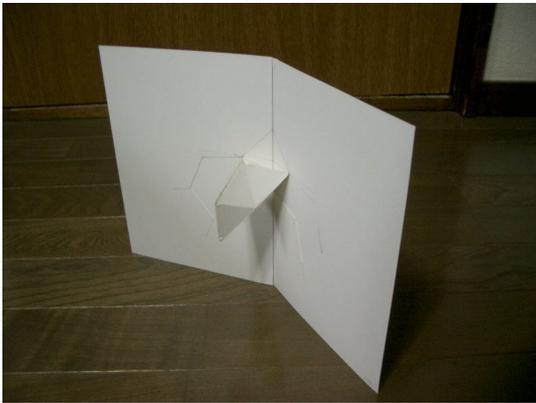
折り紙建築としてよく知られているものは主に 90 度型や 180 度型であるが、その他、台紙を 360 度完全に折り返したときに形状が起き上がる 360 度型、十二単のように紙を重ねるだけで立体感を表現する 0 度型の折り紙建築も存在する。図 2.3 は 360 度型折り紙建築の一例である。台紙を 360 度折り返すと正八面体が起き上がる。



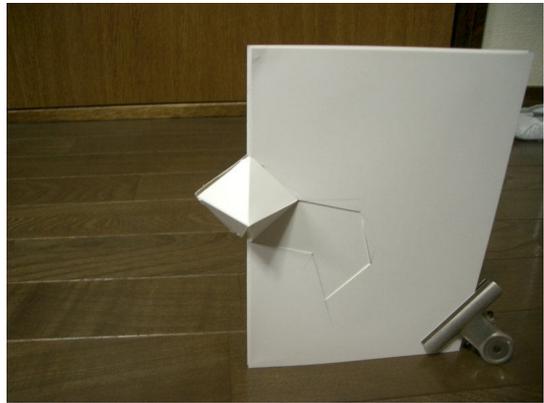
(1)



(2)



(3)



(4)

图 2.3: 360 度折り紙建築

2.2 180度型における形状表現手法

180度型の折り紙建築には大きく2種類の形状表現手法が存在する。

2.2.1 断面の集合による形状表現

1つ目の手法として、図2.2に示したような、断面形状のパーツを格子状に組み合わせることで形状を表現する手法が存在する。この手法で四角錐を表現した場合、横から見ると図2.4(a)、上から見ると図2.4(b)のようになる。断面の集合で形状を表現するため、形状の表面は擬似的に表現することしかできない。花や動物のような丸みを帯びた形状を表現する作品でよく用いられる手法である。

複数パーツを格子状に組み合わせているため、二つ折りにしたときに厚みが出てしまう。また、パーツの数が多く組み立てが煩雑である。しかし、設計支援手法 [19] が確立しているため設計は容易である。表現する形状の制約も小さい。

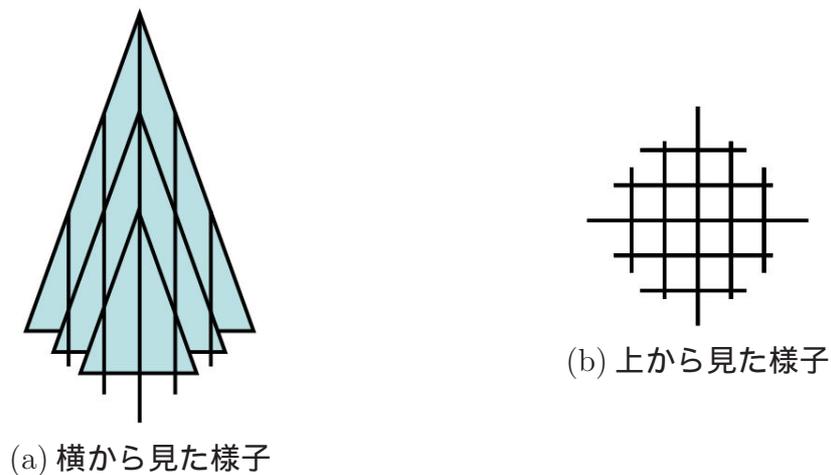


図 2.4: 断面の集合による四角錐の表現

2.2.2 表面による形状表現

もう一つの手法として、一般的なペーパークラフト同様、形状の表面をそのまま面として表現する手法が存在する。この手法で四角錐を表現した場合、横から見ると図 2.5(a)、上から見ると図 2.5(b) のようになる。形状の表面をそのまま面として厳密に表現できるため、建築物のような広い面を持った形状、プリミティブな多面体などを表現する際によく用いられる。本手法のうち、一枚の紙に切れ目を入れて起こすだけで形状を表現する手法を特に切り起こし手法と呼ぶ。切り起こし手法については次節で詳しく述べる。

表面による形状表現を対象とした設計支援手法は確立しておらず、設計が困難である。断面の集合による手法よりも表現できる形状の制約が大きい。切り起こし手法の場合は一枚の紙しか利用できないため、より設計が困難であり、形状の制約も大きい。しかし、表面による形状表現は、断面の集合による手法と比べパーツ同士の重なりが少なく、二つ折りにしたときに厚みが増さない。さらに、パーツの数が少ないため比較的組み立てやすい。一枚の紙しか用いない切り起こし手法の場合、これらの特長が顕著である。

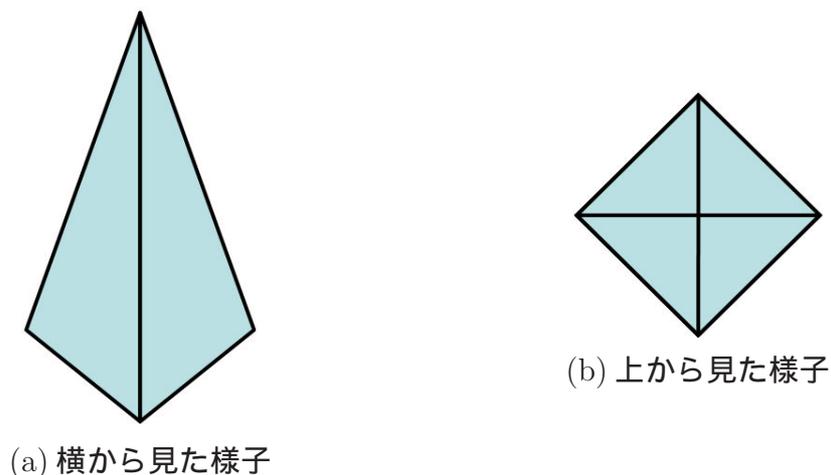


図 2.5: 表面による四角錐の表現

断面の集合による形状表現を手法 1、切り起こし以外の表面による形状表現を手法 2、切り起こしを用いた表面による形状表現を手法 3 とし、各手法の特性を表 2.1 にまとめる。各特性について A,B,C,D の 4 段階で評価する。A は優れている、B はやや優れている、C はやや劣っている、D は劣っていることを示す。

表 2.1: 形状表現の手法別特性

	収納性	形状の自由度	設計の易しさ	組み立ての易しさ
手法 1	D	A	A	C
手法 2	B	B	C	B
手法 3	A	C	D	A

(A:優れている, B:やや優れている, C:やや劣っている, D:劣っている)

2.3 切り起こし手法

切り起こし手法とは、一枚の紙にカッターで切れ目を入れて起こすことにより形状を表現する手法である。図 2.6は切り起こし手法による折り紙建築の例であり、図 2.7はその展開図である。展開図における実線は切り抜き、破線は谷折りを意味している。図 2.7の展開図を組み立て、太線部分で左右展開図を連結すると図 2.6のような形状が出来上がる。

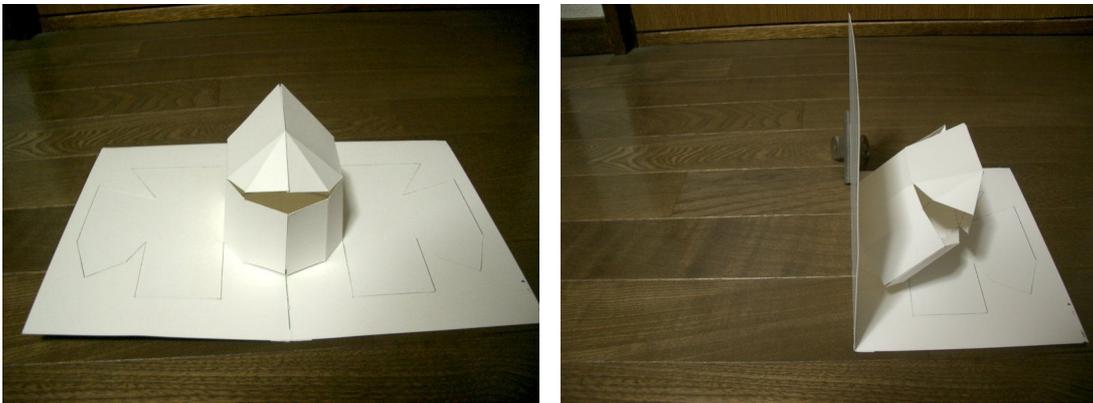
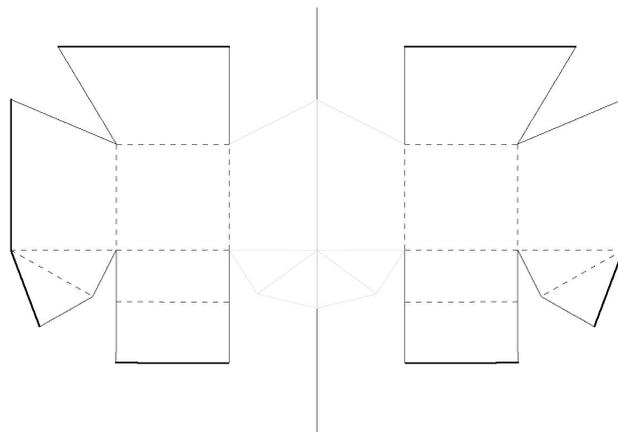


図 2.6: 切り起こし 180 度型折り紙建築



実線は切断、破線は谷折り、太線は左右連結部、中央の縦線は台紙の折り目を示す。

図 2.7: 切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図

180度型折り紙建築は形状を複数のパーツで表現するものが多い。その中で、切り起こし手法の場合は1枚の紙に切れ目を入れて折り曲げるだけで形状を表現し、紙を切り離したり付け足したりする必要がない。複数パーツを扱うものに比べて組み立てが容易であり、紙くずもほとんど出ない。台紙を折り畳むと形状が広がるように潰れてゆく。台紙を完全に閉じると台紙の切り抜き部分に形状がきれいに収まり、切り起こす前の一枚の展開図の状態に戻る。そのため、他の180度型の手法に比べて畳んだときに厚みが増さない。

多くのメリットを持つ切り起こし手法だが、180度型折り紙建築のなかでも特に設計が困難な手法である。これは「台紙を開くだけで折り畳まれていた形状が起き上がらなければならない」という折り紙建築全般の制約に加え、「1枚の紙しか使えない」「畳んだときに形状が切り抜き部分に戻らなければならない」という切り起こし手法特有の制約が存在することが原因である。

第 3 章

ポリゴンモデルからの展開図生成手法

本章ではポリゴンモデルから切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図を作り出す手法について詳細を述べる。展開図生成手法を述べるに先立ち、切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図の特徴を解説する。

3.1 切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図の特徴

切り起こし 180 度型折り紙建築は、折り目の左右から台紙を切り起こし、中央でつなぎ合わせることで形状を表現する。図 3.1 は切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図の一例である。中央の線が台紙の折り目である。

組み立ての際には、まず実線部分をカッターで切り抜く。展開図を完全に紙から切り離すのではなく、星印の辺だけは切らずに残しておくことに注意が必要である。この星印の辺は形状を台紙に固定する役割を担っており、以後、固定稜線と呼ぶ。また、固定稜線を含む面を固定面と呼ぶ。さらに、本論文では台紙も一つの面として捉える。以後、台紙の面を台面と呼ぶ。

次に破線部分を谷折りにし、辺 A は辺 A' 、辺 B は辺 B' という風に、切り起こしたパーツ同士を糊付けした和紙片でつなく。糊付けする辺は、以後、末端稜線と呼ぶ。また、末端稜線を含む面を末端面と呼ぶ。最後に、台紙に裏打ちを貼ることで切り起こし 180 度型折り紙建築が完成する。

切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図は以下の 6 つの条件を満たす。

条件 1: 左右展開図は台紙に繋がっている

条件 2: 組み立て後、全ての面は 2 つ以上の隣接面を持つ

条件 3: 台面以外の全ての面は必ず 1 つ親面を持つ

条件 4: 末端面以外の全ての面は 1 つ以上の子面を持つ

条件 5: 全ての面は親面・子面以外の隣接面を持たない

条件 6: 左右展開図の末端稜線は台紙の折り目を中心として線対称に配置される

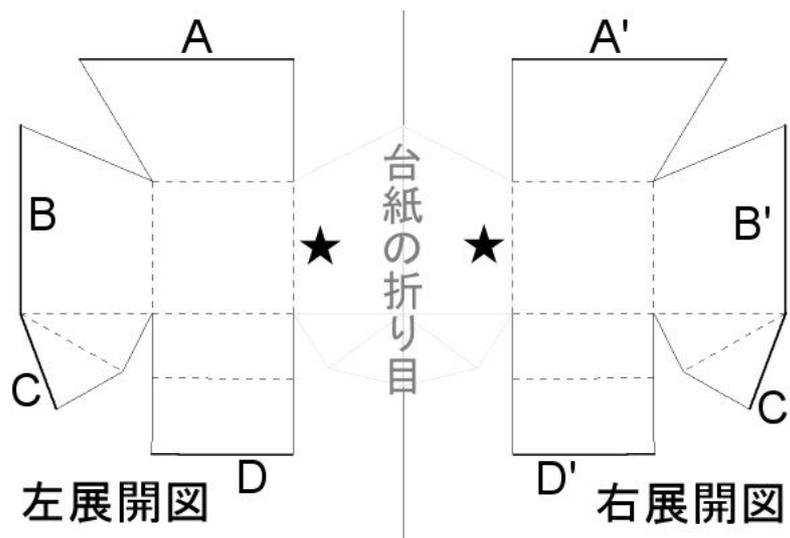


図 3.1: 切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図

これらの条件について順に説明する。

条件 1: 左右展開図は台紙に繋がっている

左右の展開図は必ず台紙に繋がっている必要がある。すなわち、展開図において切り抜かれる部分は存在しない。切り起こし手法は紙を切り起こすだけで形状を表現する手法であり、紙を切り抜いてどこかに貼る、ということがない。一続きの展開図だからこそ、二つ折りにした時に形状が切り起こす前の位置に収まる。

また、この条件は形状を起こすために必要である。切り起こし 180 度型折り紙建築で形状が起き上がるのは、台紙から形状に対して引っ張る力が働くことに起因する。図 3.2 は、切り起こし 180 度型折り紙建築の形状が起き上がる様子である。赤い矢印は力の働きを示す。台紙を開くと星印の固定稜線も一緒に動くため、台紙は左右から形状を引っ張る。仮に形状を左右どちらかにしか固定しないとすると、台紙は左右一方から形状を引っ張るため、形状は台紙と一緒に動き、起き上がらない。

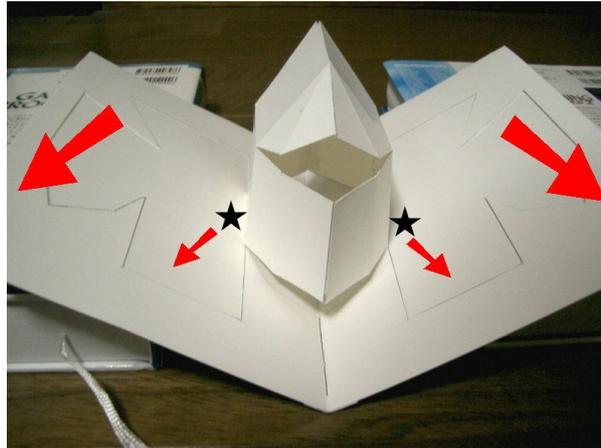


図 3.2: 台紙からの引っ張る力による形状の起き上がり

条件 2: 全ての面に 2 つ以上の隣接面

組み立て後、全ての面は 2 つ以上の隣接面を持つ。この条件は形状を維持するために必要である。面の姿勢を一意に定めるためには同一直線上に無い最低 3 点で固定する必要があり、そのためには隣接面が最低 2 つ必要である。隣接面が一つしか存在しない場合は、隣接面との角度が一意に定まらない。隣接面が一つしかない箇所が存在する場合、形状は意図しない変形をする。台面は、左右それぞれ 1 つ以上の固定面と隣接する。

条件 3 ~ 5: 隣接の親子関係

展開図において、各面の隣接面のうち台面に近い面を、本論文では親面と呼ぶ。反対に、自分自身より台面から遠い面を子面と呼ぶ。図 3.3 に示す展開図は、面 a が固定面である。すなわち、台面に最も近い面は、面 a である。ここで面 f に注目してみる。f の隣接面は g と e の 2 つである。この内、固定面 a に近いのは e であるため、f の親面は e である。反対に、固定面 a から遠いのは g であるため、f の子面は g である。他の面についても同様に考え、e の親面は a、子面は f である。末端面 d の親面は c、子面は存在しない。また、固定面 a の親面は台面、台面の子面は固定面である。

以上のように、台面以外の全ての面は必ず1つ親面を持ち、末端面以外の全ての面は1つ以上の子面を持つ。また、親子関係以外の隣接は存在しない。

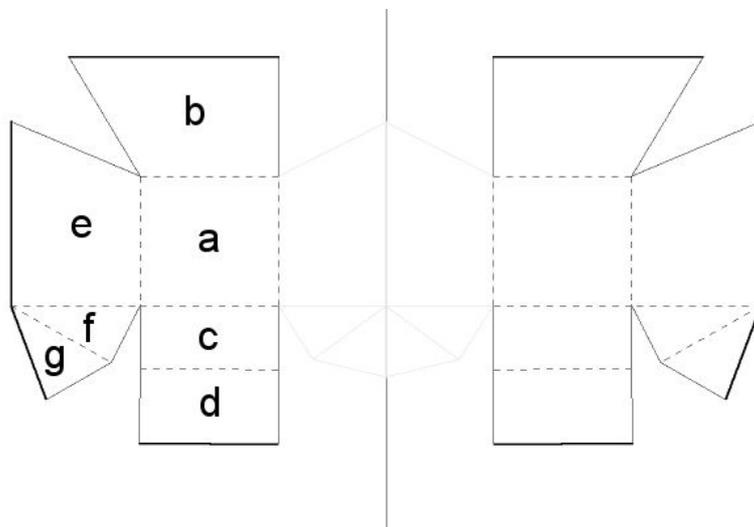


図 3.3: 親面

条件 6: 末端稜線の対称性

左右展開図の末端稜線は、台紙の折り目を中心として線対称の配置である。この条件は形状を折り畳むために必要である。切り起こし 180 度型折り紙建築は、二つ折りにしたとき、形状が完全に広がり切り起こす前の位置に収まる。この時、左右展開図の連結部分、すなわち末端稜線の位置がずれていたら、二つ折りに出来ない。故に、展開図上で末端稜線の位置が台紙の折り目を中心として線対称の配置である必要がある。

3.2 手法の概要

本研究は、ポリゴンモデルから前述の 6 条件を満たす展開図を生成する手法を提案する。本研究では、表現対象が面対称形状であることを前提とする。実際には図 3.4、図 3.5 のように、切り起こし 180 度型折り紙建築で非面対称形状を表現することは可能だが、非面対称形状を扱った作品は過去にほとんど存在しない。切

り起こし 180 度型折り紙建築で非対称形状を表現することは、対称形状と比べて遙かに設計の難易度が高い。条件 6、すなわち末端稜線の対称性を考慮しつつ非対称形状の展開図を作るのは非常に難しいことである。さらに、台紙から形状に働く力が左右非対称なので起き上がりを考慮するのも難しい。対称形状の場合、対称面で形状を分割すれば展開図は自動的に左右対称になるため、条件 6 を必ず満たす。よって、条件 1 から 5 を満たす展開図を生成すれば良い。

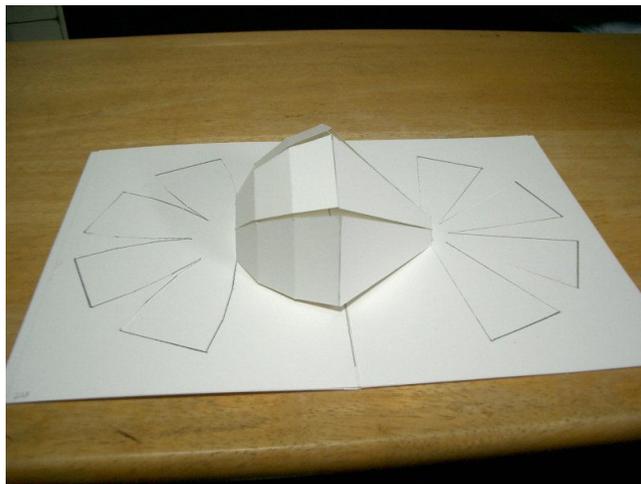


図 3.4: 切り起こし 180 度型折り紙建築 (非対称)

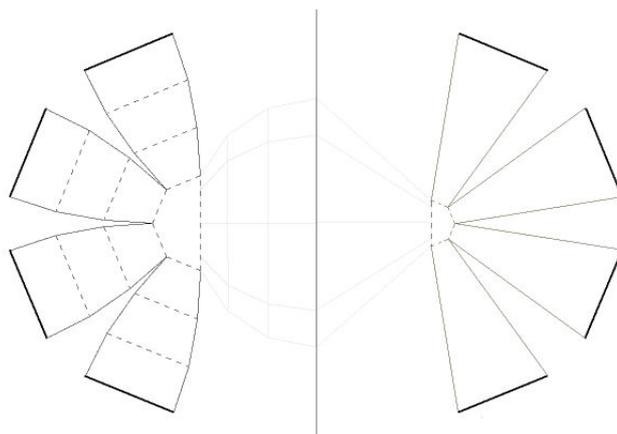
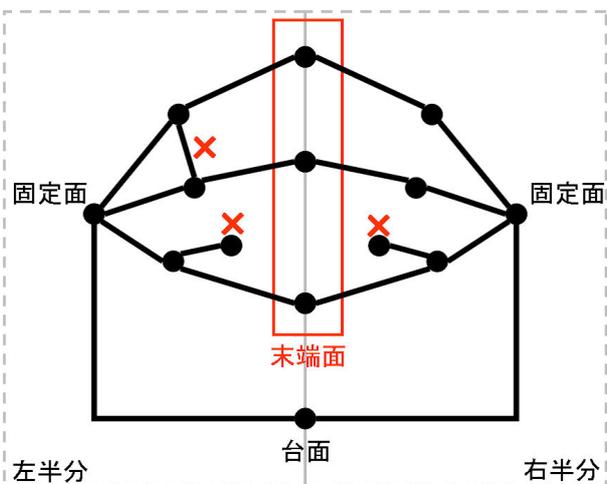


図 3.5: 切り起こし 180 度型折り紙建築 (非対称) の展開図

多面体の面を接点、稜線を枝とした、面の接続を表すグラフを「面グラフ」と呼ぶ。前述の条件1から5を満たす展開図を面グラフで表現すると図3.6、図3.7のようになる。図3.6において赤いx印が付いている箇所は、条件1~5のどれかを満たしていない部分である。x印の面は隣接面が1つだけであり、条件2を満たしていない。また、x印の稜線は親子関係でない隣接であり、条件5を満たしていない。図3.7のように、固定面が左右に複数存在しても問題ない。



(x印の箇所は条件1~5のどれかを満たしていない部分)

図3.6: 展開図の面グラフ (1)

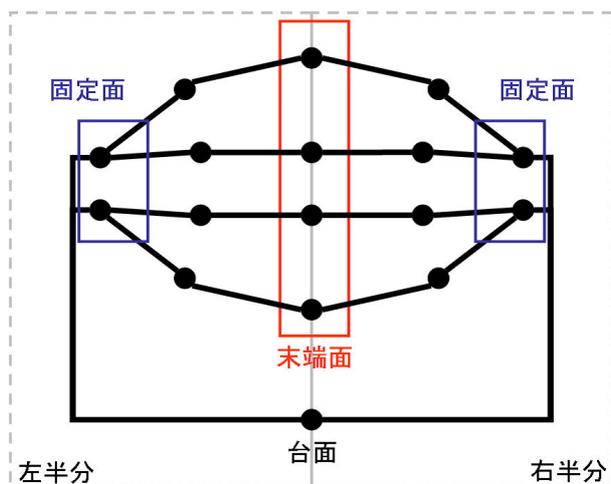


図3.7: 展開図の面グラフ (2)

展開図の生成は以下の手順で行う。

1. 末端稜線の作成
2. 固定稜線の決定
3. 全ての面にレベル値を付与
4. 全ての面に対し親面を決定

各手順について詳細を述べる。

3.3 末端稜線の作成

最初に、ポリゴンモデルに対して末端稜線を作成する。本研究では表現対象を面対称形状に限定しており、対称面で形状を左右に分割することを前提としている。そのため、ポリゴンモデルと対称面の交線が、末端稜線となる。

図 3.8は末端稜線の作成を説明する物である。まず、対称面上に存在する稜線を末端稜線とする。次に、各ポリゴンが対称面と交差しているか判定する。交差している場合はポリゴンを対称面で分割し、稜線を作る。この稜線を末端稜線とする。最後に、末端稜線を含む全ての面を末端面とし、末端面リスト L_{end} として保持しておく。

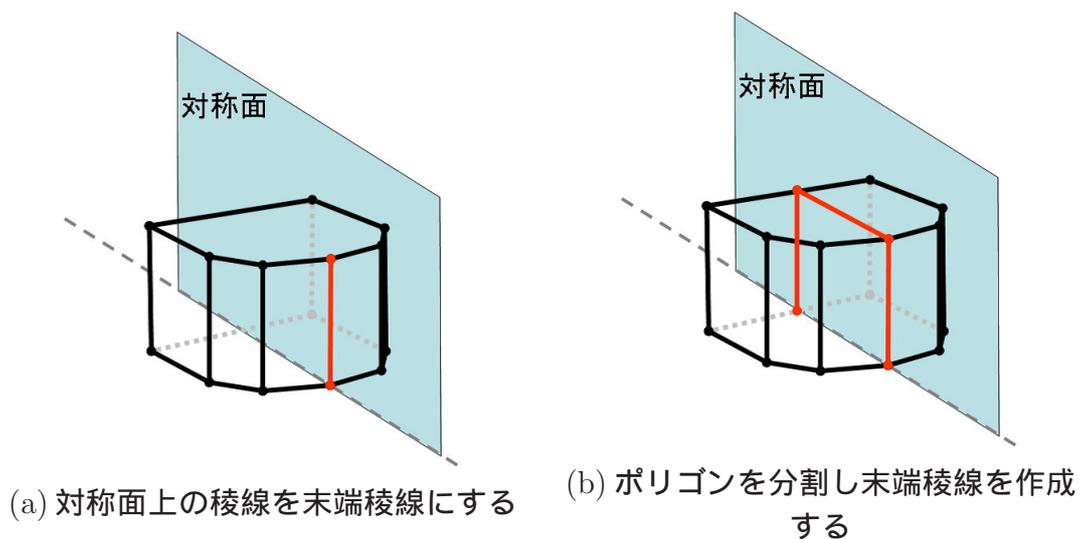


図 3.8: 末端稜線の作成

3.4 固定稜線の決定

次に固定稜線を決定する。固定稜線を決定する際、以下の3つの条件を考慮する必要がある。条件1は絶対満たさなければならない条件である。また、条件2は条件3よりも優先度が高い。

条件1: 必ず形状の底面を構成する稜線

条件2: 出来るだけ形状の外側の稜線

条件3: 出来るだけ長い稜線

先述の通り、固定稜線は形状を台紙に固定する部分である。そのため、固定稜線は形状と台紙の接触部分、すなわち、形状の底面から選択する必要がある。また、固定稜線は形状を左右から引っ張る役割を担う。先述の通り、形状が起き上がるためには台紙からの引っ張る力が重要である。図3.9に示すとおり、折り目から遠い位置ほど力は強く働く。そのため、形状として組み立てたとき台紙の折り目から遠くに位置する稜線、すなわち、形状の出来るだけ外側の稜線を固定稜線とすることが望ましい。さらに、固定稜線は台紙から形状への唯一の作用点となる部分であり、強度の面から出来るだけ長い稜線であることが望ましい。

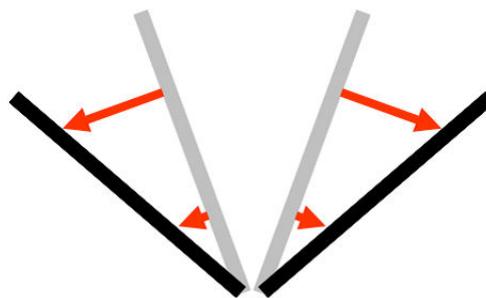


図 3.9: 折り目から遠い位置ほど引っ張る力が強く働く

上記条件を満たす稜線を選択し、固定稜線とする。稜線選択の手順は以下の通りである。図 3.11は、図 3.10に示すポリゴンモデルを例として各手順を説明する物である。

1. 形状の底面を構成する頂点の集合 V_1 を抽出する。
2. V_1 の内、形状として組み立てたときに台紙の折り目から最も遠い頂点を、頂点の集合 V_2 とする。
3. 形状の底面を構成し、かつ、 V_2 に接続している稜線の集合 E を抽出する。
4. 稜線の集合 E から、出来るだけ長く、かつ、出来るだけ外側の稜線を選択し、固定稜線とする。

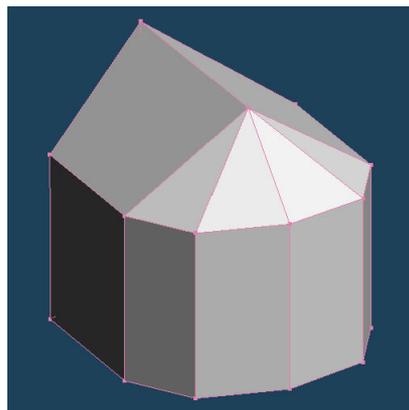
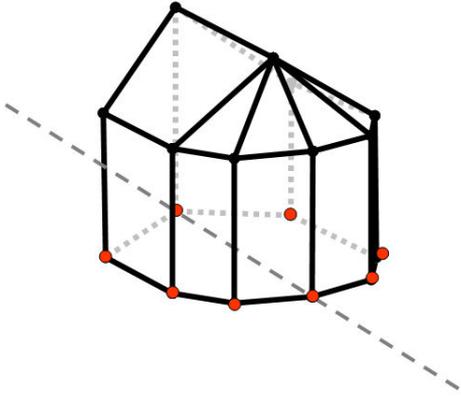
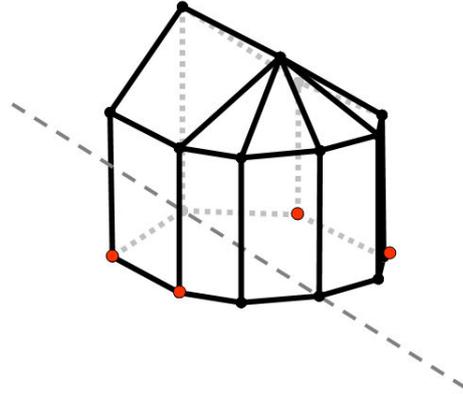


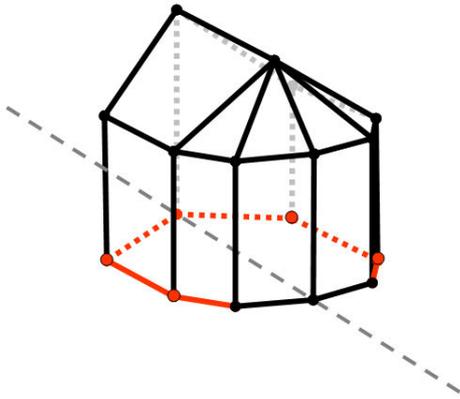
図 3.10: ポリゴンモデル



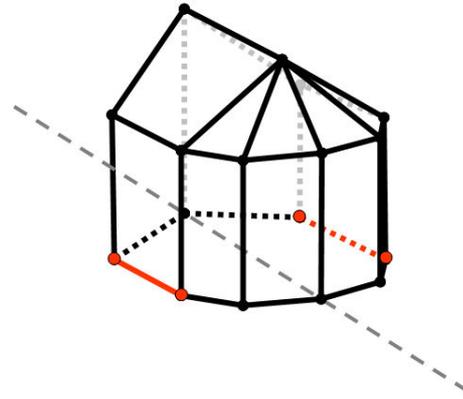
(1) 頂点の集合 V_1 の抽出



(2) 頂点の集合 V_2 の抽出



(3) 稜線の集合 E の抽出



(4) 固定稜線の決定

図 3.11: 固定稜線の選択

手順4の詳細を説明する。図3.12は稜線の集合 E を例示するものである。なお、表現する形状は面对称であるため、以降右半分は省略し、左半分のみを用いて説明する。破線は台紙の折り目を意味する。稜線の集合 E から固定稜線を選択する場合を考える。3本の稜線の中から出来るだけ長く、かつ、出来るだけ外側の稜線を選択する。ここで、 E の稜線は最も外側の頂点 $v \in V_2$ を最低1個端点に持っているため、台紙の折り目に平行であるほど外側である、と判定できる。図3.12(a)の場合、最も外側の稜線は a 、最も長い稜線は c である。出来るだけ外側、という条件の方が優先順位が高いため、稜線 a を固定稜線として選択するのが妥当である。図3.12(b)の場合、最も外側の稜線は a であるが、稜線 a は全体のスケールに対して極端に短い。固定稜線としては強度の面で問題があり、 b か c を固定稜線として選択した方が組み立て後に形状が安定する。この時、 b よりも c の方が外側であるため、 c を固定稜線として採用した方が台紙からの力が効率よく伝わる。本研究では、このような複雑な判定を効率的に行うため、固定稜線としての適性度を数値として算出する手法を提案する。

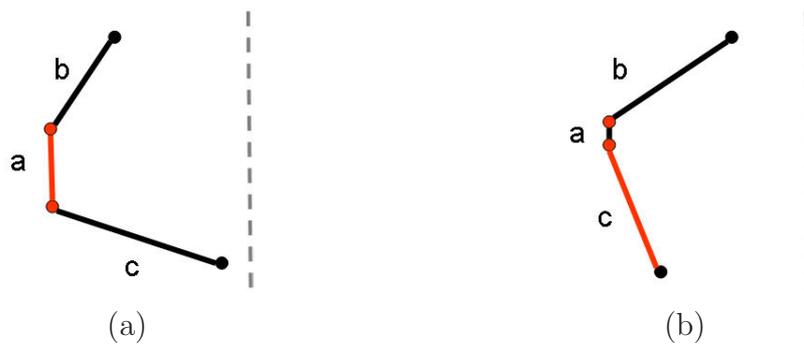


図 3.12: 角度と長さによる固定稜線の決定

E の各稜線 e に対して以下のような評価関数を適用し、固定稜線としての適性を固定稜線評価値 S として算出する。

$$S(e) = w_a S_a(e) + w_l S_l(e) \quad (3.1)$$

ここで、 S_a, S_l は稜線の評価値を得る関数であり、 $W = [w_a, w_s]$ は関数の重み付けを行うための実数パラメータである。固定稜線評価値 S が最大の稜線を、固定稜線として採用することとする。以下に各関数の詳細について述べる。

角度評価関数

稜線が台紙の折り目とどれだけ平行であるかを評価する関数である。ここで V_e は稜線 e の両端点を結ぶベクトル、 V_f は台紙の折り目方向のベクトルである。両ベクトルを正規化し、その内積値の大きさを求める。稜線 e が台紙の折り目と平行であれば 1、直交する場合は 0 が返る。

$$S_a(e) = \left| \frac{V_e}{|V_e|} \cdot \frac{V_f}{|V_f|} \right| \quad (3.2)$$
$$(0 \leq S_a(e) \leq 1)$$

長さ評価関数

稜線の長さを評価する関数である。分子の V_e は稜線 e の両端点を結ぶベクトルのノルム、分母は稜線の集合 E における最長の稜線のノルムである。稜線 e が最長の稜線であれば 1、最長の稜線の半分の長さであれば 0.5 が返る。

$$S_l(e) = \frac{|V_e|}{\max_{i \in E} |V_i|} \quad (3.3)$$
$$(0 < S_l(e) \leq 1)$$

以上の関数により、固定稜線評価値 S は次の式で表現できる。

$$\begin{aligned} S(e) &= w_a S_a(e) + w_l S_l(e) \\ &= w_a \left| \frac{V_e}{|V_e|} \cdot \frac{V_f}{|V_f|} \right| + w_l \frac{|V_e|}{\max_{i \in E} |V_i|} \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.5 レベル値の付与

固定稜線を含む面を固定面 l_0 とする。固定面 l_0 から全ての面へ幅優先探索を行い、各面に対してそこに至るまでに経由する面の数をレベル値として付与する。

図 3.13 と図 3.14 は、図 3.10 で示したポリゴンモデルを例として手順を説明するものである。図 3.13(a) は末端稜線と固定稜線が決定したポリゴンモデルの左半分を示す。この場合、固定面 $l_0 = a$ 、末端面リスト $L_{end} = \{b, d, e, g\}$ である。これを面グラフで表現すると図 3.13(b) のように表現できる。固定面 $l_0 = a$ から全ての面に幅優先探索を行い、各面に対してそこに至るまでに経由する面の数をレベル値として付与すると図 3.14 のようになる。ここで四角囲みの数値がレベル値である。

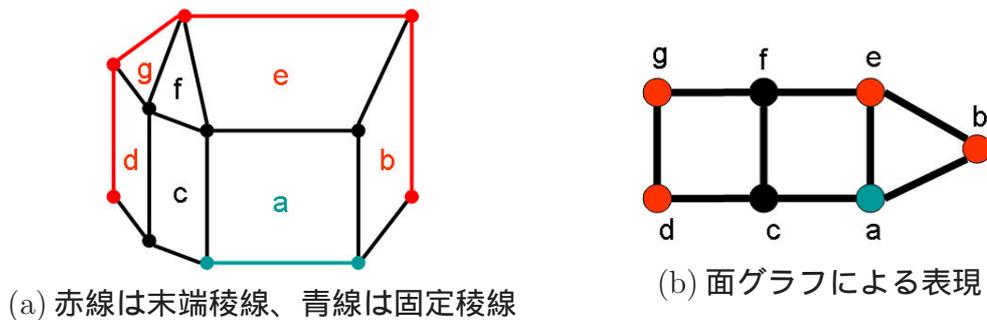
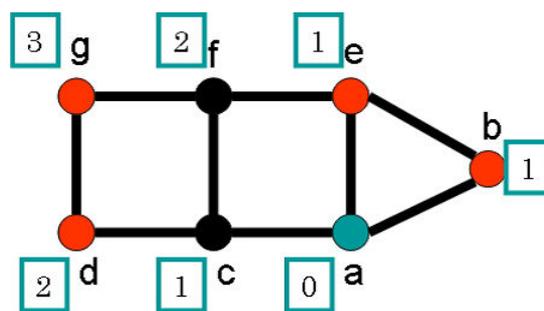


図 3.13: 末端稜線と固定稜線が決定したポリゴンモデル (左半分)



四角囲みの数値がレベル値

図 3.14: レベル値の付与

3.6 親面の決定

3.6.1 基本手順

以下の手順でポリゴンモデルの全ての面に対して親面を決める。最後に親子関係の無い隣接面同士を切り離すことで展開図が完成する。

1. 末端面リスト L_{end} に含まれる面の内、レベル値が最小の面を選択し l_{cur} とする。同時に、 l_{cur} を末端面リスト L_{end} から削除する。
2. l_{cur} の隣接面の内、レベル値が l_{cur} のレベル値よりも小さい面を隣接リスト L_{nbr} に追加する。
3. L_{nbr} の内、親面がまだ決まっていない面を最優先隣接リスト L_p に、親面が決まっている面を合流隣接リスト L_j に追加する。
 - *if* 最優先隣接リスト L_p が空でない
 L_p から一つ面を選択し、 l_{next} とする。
 - *else*
合流隣接リスト L_j から一つ面を選択し、 l_{next} とする。
4. リスト L_{nbr}, L_p, L_j を空にする。
5. 面 l_{next} を面 l_{cur} の親面とする。
 - l_{next} の親面がまだ決まっていない
 l_{next} を l_{cur} として手順 2 に戻る。
 - *else*
 - *if* 末端面リスト L_{end} が空
終了
 - *else*
手順 1 に戻る。

前節図 3.14 のレベル値が付与された状態から、順を追って親面決定の流れを説明する。また親面決定の流れをフローチャートとして図 3.16 に示す。

手順 1

まず、末端面リスト $L_{end} = \{b, d, e, g\}$ に含まれる面の内、レベル値が最小の面を選択し l_{cur} とする。ここで、 b と e のレベル値が最小である。ここでは $l_{cur} = b$ とする。 b を末端面リスト L_{end} から削除する。

手順 2

$l_{cur} = b$ の隣接面の内、レベル値が l_{cur} 自身のレベル値よりも小さい面を隣接リスト L_{nbr} に追加する。この場合 a を隣接リスト L_{nbr} に追加する。

手順 3

$L_{nbr} = \{a\}$ の内、親面がまだ決まっていない面を最優先隣接リスト L_p に、親面が決まっている面を合流隣接リスト L_j に追加する。 a は固定面であり、親面は台面である。既に親面が決まっているため、合流隣接リスト L_j に a を追加する。最優先隣接リスト L_p が空であるため、合流隣接リスト $L_j = \{a\}$ から一つ面を選択し、 l_{next} とする。 $l_{next} = a$ となる。

手順 4

リスト L_{nbr}, L_p, L_j を空にする。

手順 5

面 $l_{next} = a$ を面 $l_{cur} = b$ の親面とする。この時点の状態を面グラフで表現したものが図 3.15(a) である。図中の矢印は子面から親面への隣接を示す。 $l_{next} = a$ の親面は既に決まっており末端面リスト $L_{end} = \{d, e, g\}$ が空でないため、手順 1 に

戻る。同様の手順を繰り返し、各面の親面を決定する。面グラフは図 3.15(b) から図 3.15(e) のように変化してゆく。

各面の親面が決まったら、図 3.15(f) に示すとおり親子関係のない隣接面同士を切り離す。最後に、図 3.15(g) のように各面を平面上に配置することで、展開図が完成する。

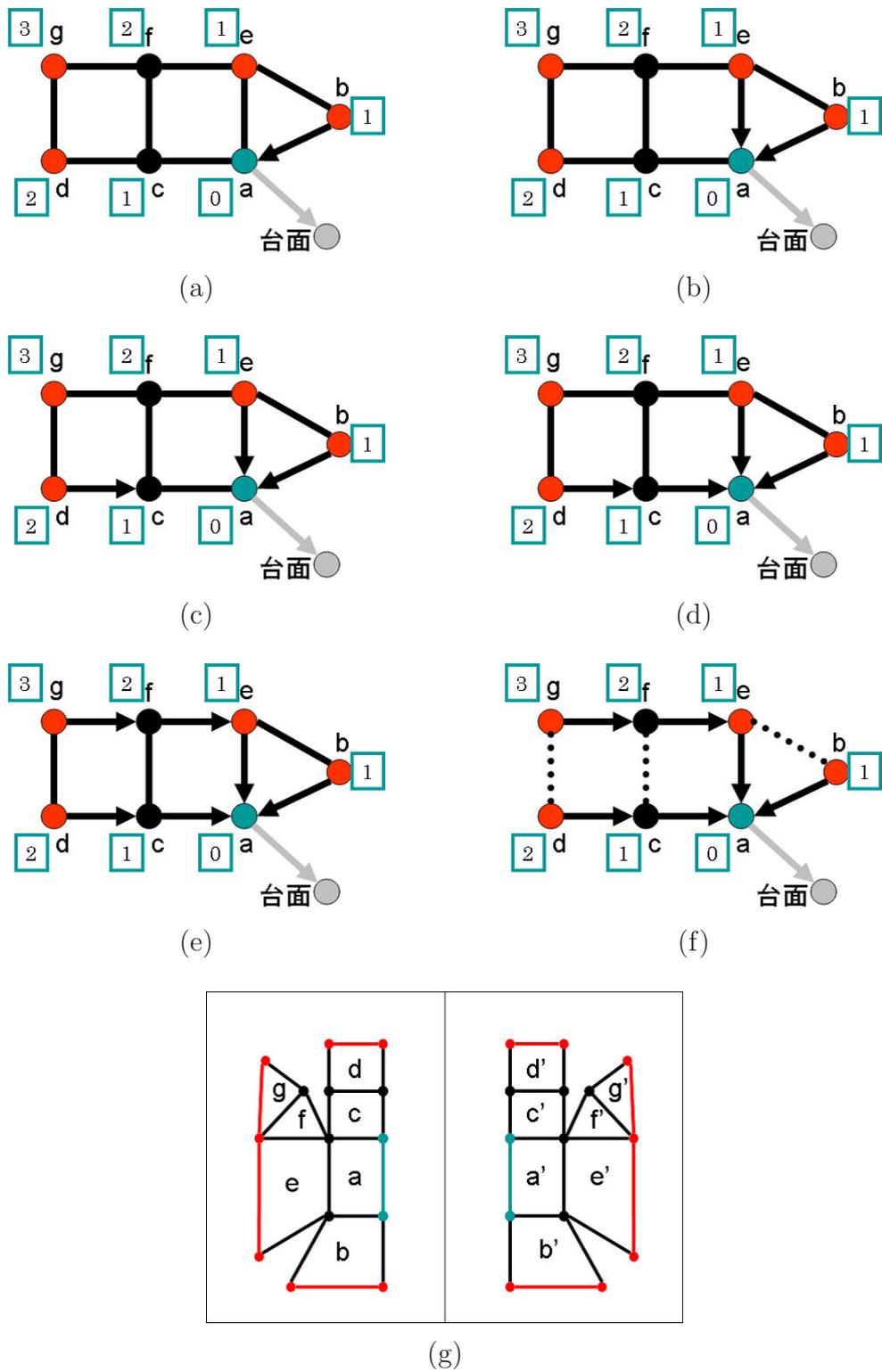


図 3.15: 親面の決定 (矢印は子面から親面への隣接を示す)

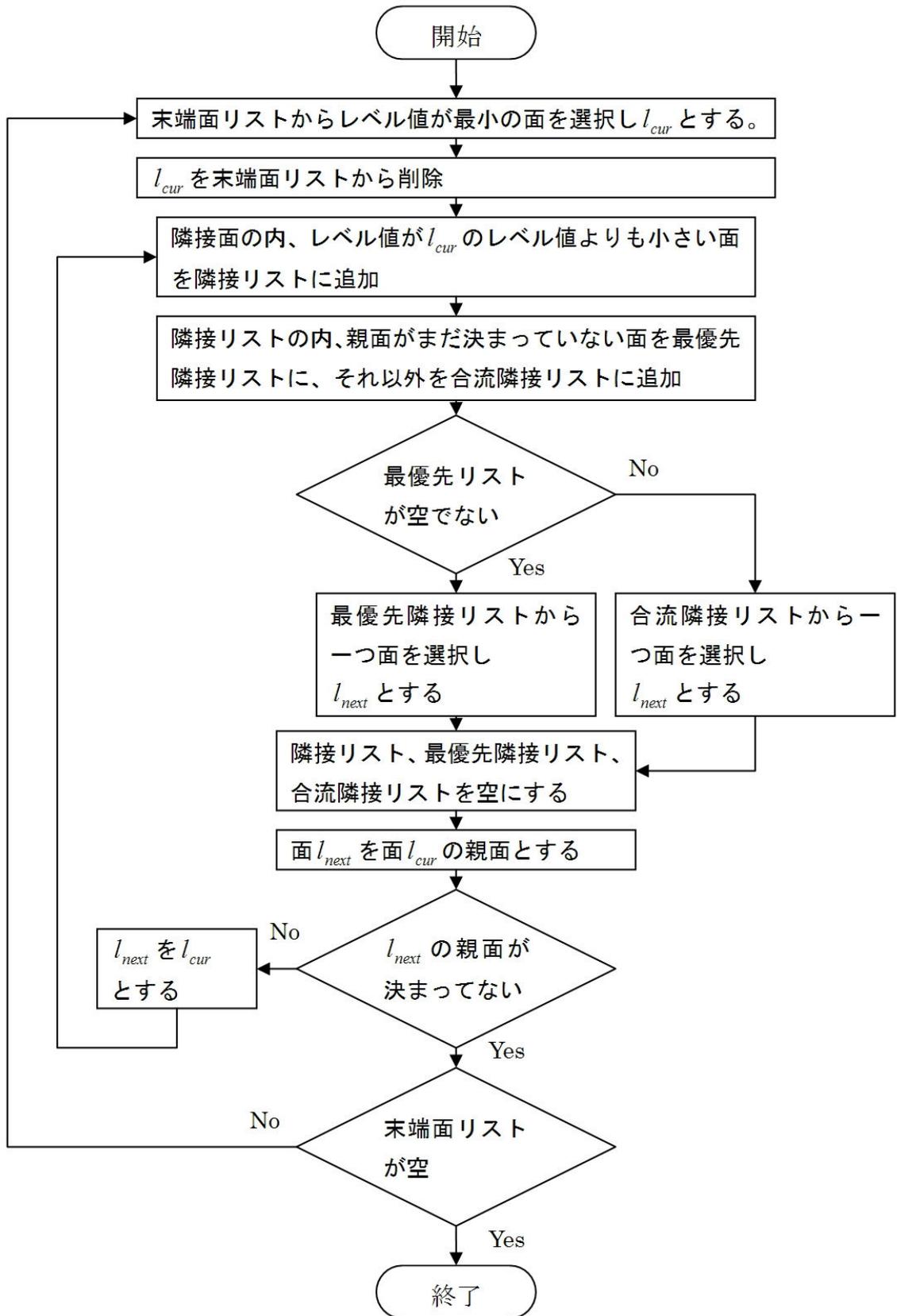


図 3.16: 親面決定の流れ

3.6.2 隣接評価値

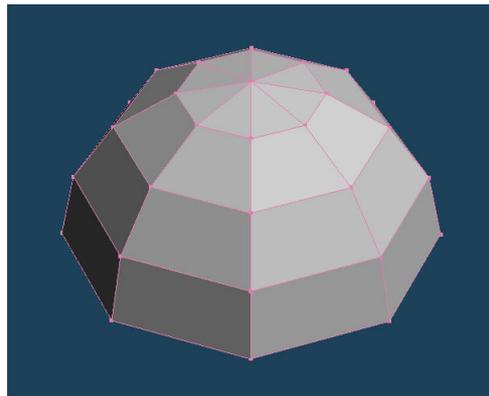
手順3において各面の親面を1つ決定する際、隣接リストに含まれる全面について、親面としての適性度を数値として算出する。本研究では親面としての適性度を隣接評価値と呼ぶ。隣接評価値が最も高い面を親面として選択する。隣接面との共有稜線に対し以下の2点を調べ、隣接評価値を算出する。

- 隣接の向きの連続性
- 共有稜線の長さ

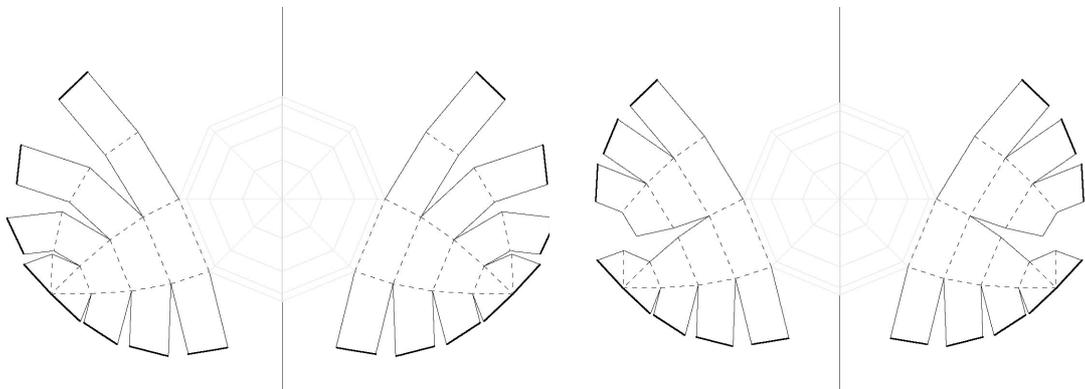
展開図は出来るだけりんごの皮むきのように帯状に面が連なっている方がデザイン的に美しい。図3.17(b)、図3.17(c)は、図3.17(a)の半球の展開図である。(b)は隣接の連続性を考慮した展開、(c)は隣接の連続性を無視した展開である。(c)の展開図の方が形状を構成するポリゴンの角が目立つ。しかし、球体には本来「角」は存在しない。直方体など角張った形状を表現するのであれば問題ないが、丸みを帯びた形状や複雑な形状を多面体で疑似表現している場合、ポリゴンの角が目立たない展開をすべきである。また、面と面の共有稜線が短いと形状が歪みやすい。強度を保つため、面同士の共有稜線は長い方が良い。以上のことを踏まえ、隣接リスト L_{nbr} に含まれる全面との共有稜線 e について以下の評価式を適用し、隣接評価値 N として算出する。

$$N(e) = w_c N_c(e) + w_l N_l(e) \quad (3.5)$$

ここで、 N_c, N_l はそれぞれ隣接の向きの連続性、共有稜線の長さの評価値を得る関数である。また $W = [w_c, w_l]$ は関数の重み付けを行うための実数パラメータである。隣接評価値 N が最大の面を親面として採用することとする。以下に各関数の詳細について述べる。



(a) 表現対象



(b) 隣接の向きを連続性を考慮した展開 (c) 隣接の向きを無視した展開

図 3.17: 隣接の連続性

連続性評価関数

図 3.18 は連続性評価関数を説明する物である。 l_{cur} は現在の面、すなわちこれから親面を決定する面である。 $n_i (i = 1, 2, 3)$ は隣接リストに含まれる面、すなわち現在の面よりレベル値の小さい面である。 l_{prev} は現在の面の子面、 V_{prev} は l_{cur} と l_{prev} の共有稜線の両端点を結ぶベクトルである。 $e_i (i = 1, 2)$ は隣接リストに含まれていない面である。帯状に連なった隣接を実現するためには、 l_{prev} の反対側に位置する n_2 を親面として選択するのが妥当である。どれだけ子面と反対側に位置しているかを調べるため、隣接リストに含まれる全ての面について、反時計回りに共有稜線の両端点を結ぶベクトルを用意する。これらを共有稜線ベクトルと呼ぶ。共有稜線ベクトルと V_{prev} をともに正規化し内積値を求める。内積値が小さいほど、両ベクトルは逆向きであることになる。 V_{prev} に対し出来るだけ逆向きの共有稜線ベクトルを調べ、その稜線を共有する隣接面を、子面の反対側に位置している面とする。

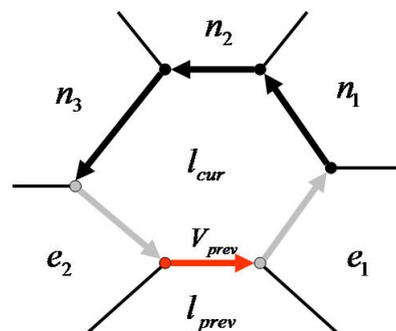


図 3.18: 連続性評価値

連続性評価関数は以下の通りである。ここで V_e は共有稜線ベクトルである。共有稜線のベクトルが V_{prev} の真逆であれば 1、一致する場合は 0 が返る。

$$N_c(e) = \frac{1}{2} \left(\frac{-V_{prev}}{|V_{prev}|} \cdot \frac{V_e}{|V_e|} + 1 \right) \quad (3.6)$$

$$(0 \leq N_c(e) \leq 1)$$

共有稜線長さ評価関数

二面の共有稜線の長さを評価する関数である。分子の V_e は共有稜線 e の両端点を結ぶベクトルのノルム、分母は隣接リストに含まれる全面との共有稜線 E のうち最長の稜線のノルムである。共有稜線 e が最長の稜線であれば 1、最長の稜線の半分の長さであれば 0.5 が返る。

$$N_l(e) = \frac{|V_e|}{\max_{i \in E} |V_i|} \quad (3.7)$$

$$(0 < N_{length}(e) \leq 1)$$

以上の関数により、隣接評価値 N は次の式で表現できる。

$$\begin{aligned} N(e) &= w_c N_c(e) + w_l N_l(e) \\ &= w_c \frac{1}{2} \left(\frac{-V_{prev}}{|V_{prev}|} \cdot \frac{V_e}{|V_e|} + 1 \right) + w_l \frac{|V_e|}{\max_{i \in E} |V_i|} \end{aligned} \quad (3.8)$$

第 4 章

システムの実装と評価

本章では、提案手法を元の実装した展開図設計支援システムについて述べ、評価を行う。4.1 節では設計支援システムの概要と、個々の機能について解説する。4.2 節では本システムによる展開図の生成結果を示す。4.3 節では生成結果に対し評価を行う。

4.1 設計支援システム

本研究では、一般のモデリングソフトを用いて作成したポリゴンモデルから折り紙建築の展開図を変換生成するシステムを実装した。実装において C++ 言語を用い、グラフィクスライブラリには OpenGL の上位ライブラリである渡辺らの FK システム [21] を用いてアプリケーションを作成した。

折り紙建築で表現したい形状をユーザがあらかじめポリゴンモデルとして用意しておくこととする。以降この形状データを入力形状と呼ぶ。ユーザは入力形状を CG で表現した台紙の上に配置し、自由にレイアウトを決める。レイアウト決定後、システムは入力形状に自動的に切れ目を入れ、折り紙建築の形状を生成する。入力形状から生成された折り紙建築の形状を、以降バーチャル折り紙建築と呼ぶ。バーチャル折り紙建築はインタラクティブに開閉することが可能で、ユーザは直感的に完成イメージを得ることが出来る。ユーザにとって納得のいく結果が得られた場合は、展開図を BMP 画像ファイルとして出力することが出来る。展開図画像ファイルは実際に印刷し、折り紙建築制作に利用できる。

本システムは以下の機能を持つ。

- 入力形状の配置支援
- 面对称形状への変換
- 同一平面に近い隣接面の統合
- バーチャル折り紙建築
- 展開アニメーション

- 形状の4分割

システムの個々の機能について解説する。

4.1.1 入力形状の配置支援

図 4.1は本システムの入力形状配置画面であり、バーチャルの台紙の上に入力形状を読み込んだところである。形状の下部の長方形が、バーチャルの台紙である。形状はマウスのドラッグによって移動、回転、拡大縮小することができる。台紙の折り目の上に半透明の板が立っているが、これは形状を配置する際に折り目の位置の目安として機能する。以降、この半透明の板をパーティションと呼ぶ。面对称形状を読み込んだ場合は、形状の対称面とパーティションが一致するように配置する。形状は自由に動かすことができるが、折り紙建築として実現不可能なレイアウトも存在する。切り起こし 180 度型折り紙建築では、形状が台紙に接触していないレイアウト、形状が台紙の折り目を跨いでいないレイアウトは実現不可能である。ユーザが決定したレイアウトに対して判定を行い、上記 2 通りのいずれかのレイアウトだった場合は警告メッセージを出し、レイアウトの再検討を促す。図 4.2は形状が台紙に接触していないことを警告するメッセージ、図 4.3は形状が折り目を跨いでいないことを警告するメッセージが表示されている様子である。

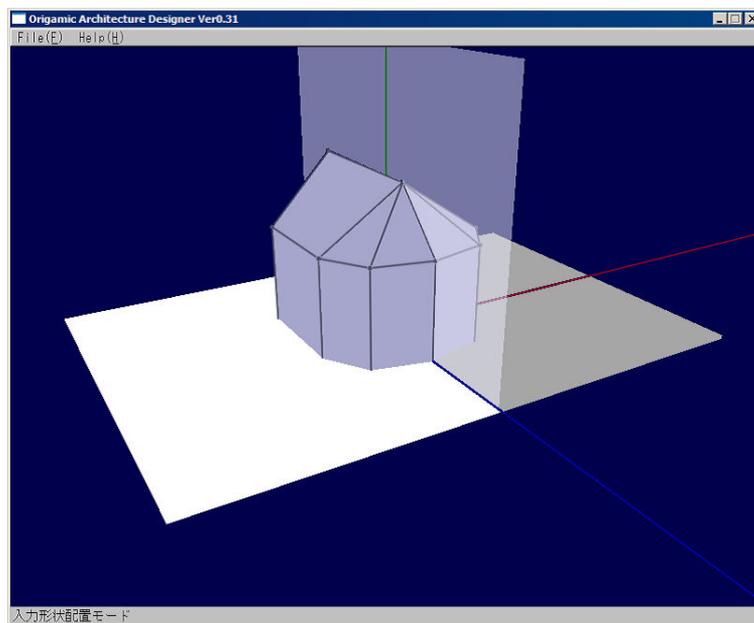


図 4.1: 入力形状配置画面

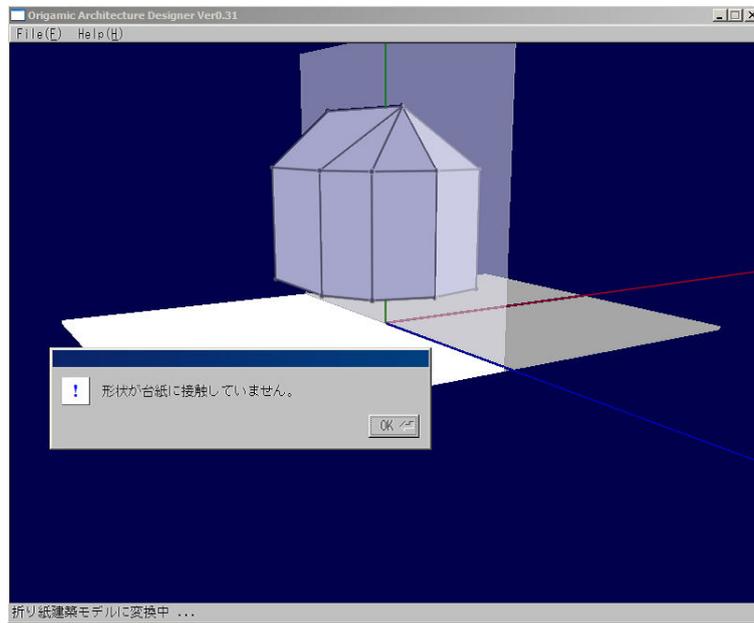


図 4.2: 配置に対する警告機能 : 形状が台紙に接触していない

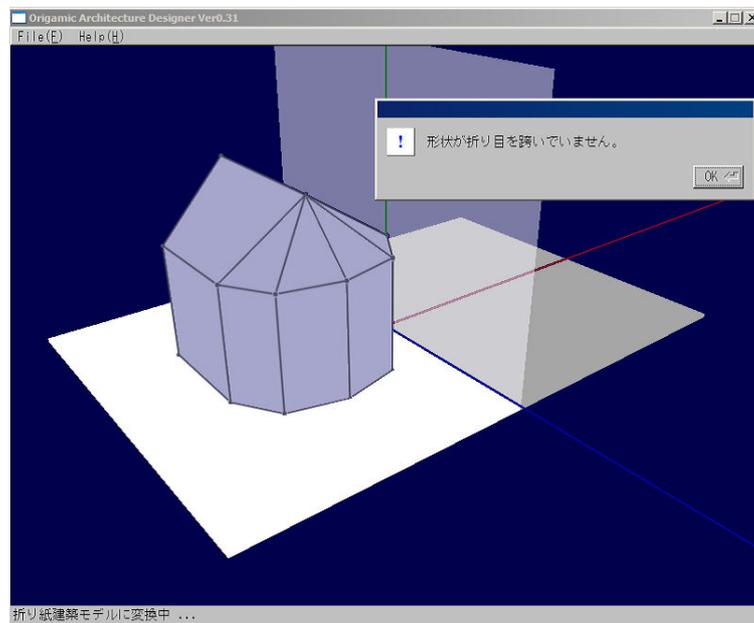


図 4.3: 配置に対する警告機能 : 形状が折り目を跨いでいない

4.1.2 面对称形状への変換

本研究は、面对称形状に限定して折り紙建築の設計支援手法を提案している。しかし、面对称形状を用意し、先述の入力形状配置画面において形状の対称面をパーティションにぴったり合わせるのは、煩雑な作業である。本システムは、どんな入力形状も強制的に面对称形状に変換することで、上記の問題を解決している。入力形状をバーチャル折り紙建築に変換する前に、入力形状をパーティションで分割する。パーティションより右側の部分を削除し、代わりに左側の鏡像を配置する。これにより面对称形状が出来上がる。図 4.4は面对称形状への変換を説明するものである。(a) は入力形状配置画面である。この配置でバーチャル折り紙建築に変換すると、(b) のようになる。パーティションより右側は削除され、左側の鏡像が生成されている。この機能により、面对称形状をわざわざ用意する必要がなくなる。

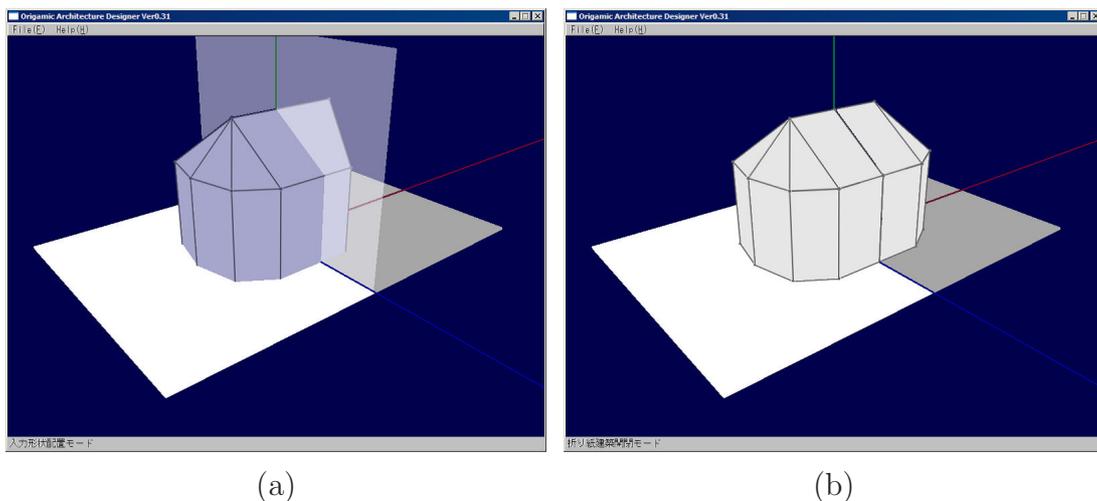


図 4.4: 面对称形状への変換

4.1.3 同一平面に近い隣接面の統合

同一平面に近い隣接面、すなわち隣接角の極めて小さい二面は、入力形状からバーチャル折り紙建築に変換する時点で統合する。図 4.5は同一平面に近い隣接面の統合を説明する物である。(a) はオリジナルの入力形状で、(b) は処理後の状態である。六角柱の天面が三角形 6 つで構成されているが、本処理によって統合されている。少しでもポリゴン数を削減することで、後述の開閉シミュレーションの軽量化を図る。

隣接角を調べるには二面の単位法線ベクトルを求め、それらの内積を求める。内積値が 1 に近ければ、二面はほぼ同じ向きであると判定できる。判定には以下の条件式を用いる。二面の単位法線ベクトルを m, n とし、条件を満たすとき二面を統合する。 ε はゼロに近い小さな数値であり、本システムでは 10^{-3} とした。

$$m \cdot n > 1.0 - \varepsilon \quad (4.1)$$

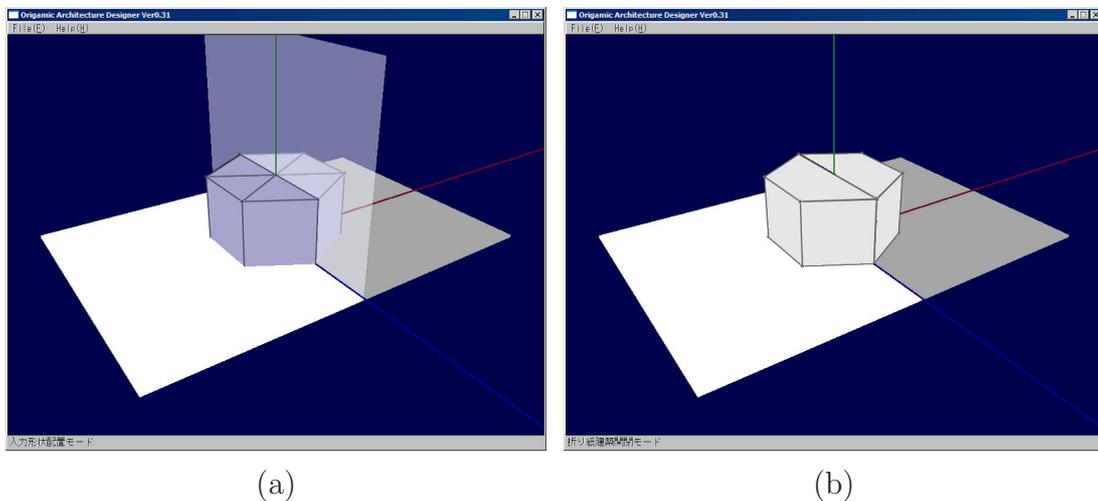


図 4.5: 限りなく平面に近い隣接面の統合

4.1.4 バーチャル折り紙建築

展開図生成処理で得られる面の連結情報を元にポリゴンモデルを再構築し、バーチャル折り紙建築を生成する。折り紙建築が開閉する様子をアニメーション提示する際、幾何学的計算による手法と力学的計算による手法の2通りの方針が考えられる。今回は、台紙からの外力による形状の変形をシミュレートすることが目的であり、力学的手法を採用した。切り起こし180度型折り紙建築には紙のたわみを利用した作品も存在するが、本研究では紙のたわみを考慮せず、折り目の角度以外は変化しないことを前提とする。面の歪みを無くするため、バーチャル折り紙建築の全ての面について面を構成する全頂点間にバネ要素を設定する。台紙が動くとき、台紙に接している頂点に変位が生じ、周辺に応力が生じる。応力を元に全頂点を移動し再び全頂点の応力を求める。頂点の移動と応力計算を繰り返し、応力が一定以下になったら描画する。これにより、図4.6に示すような開閉のアニメーションを実現している。

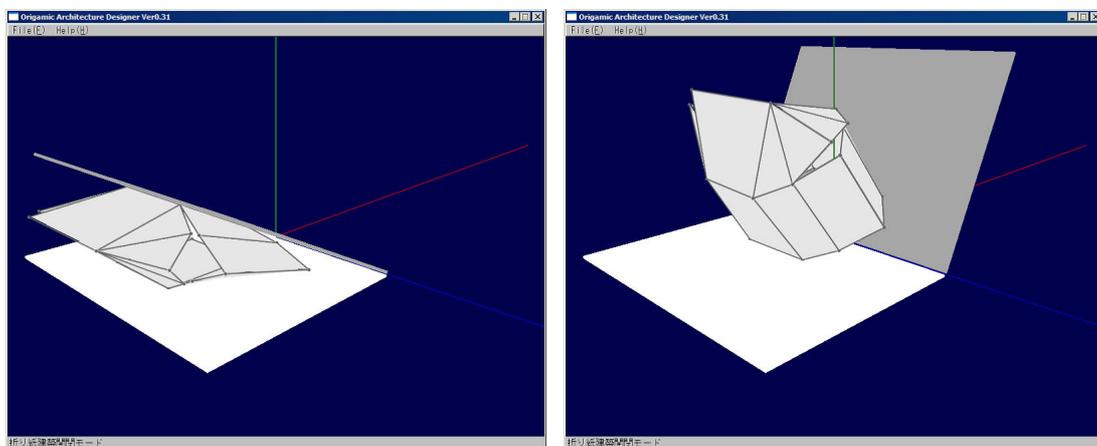


図 4.6: バーチャル折り紙建築の開閉

4.1.5 展開アニメーション

図 4.7に示すような、バーチャル折り紙建築が展開されてゆき一枚の紙になる様子をアニメーション表示する機能を実装した。この機能により、展開図と完成作品の対応を直感的に理解することができる。

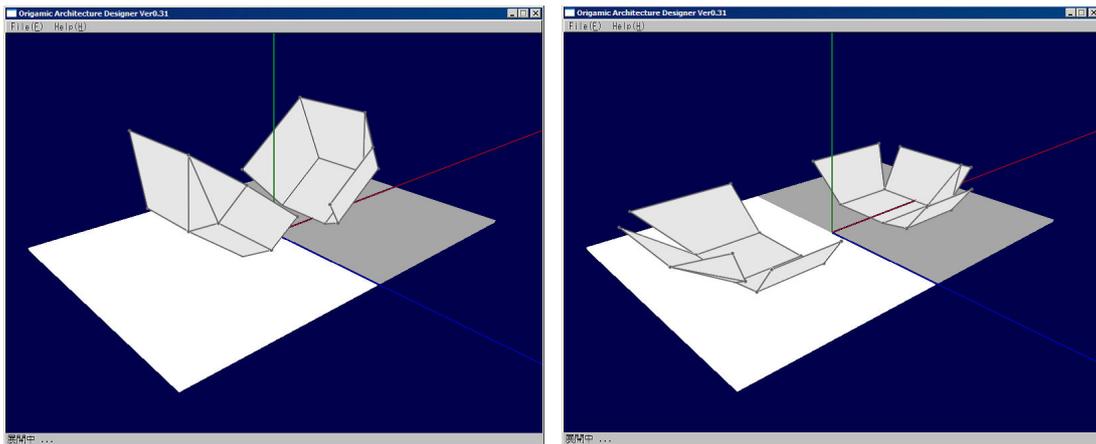


図 4.7: 展開アニメーション

まず、固定稜線を回転軸とし、固定面(レベル0)以下全ての子面を回転する。固定面が台紙と接触したら、固定面とその子面(レベル1)の共有稜線を回転軸とし、レベル1以下の全ての子面を回転する。レベル1の面が台紙に接触したら、レベル2以下に対しても同様の処理を繰り返す。末端面に至るまで再帰的に回転を繰り返し、最終的に全ての面が台紙に接触して終了となる。図 4.8は再帰的な面の回転処理を説明する物である。簡略化のため面を真横から見ていることとし、面を線分、稜線を点で表現している。

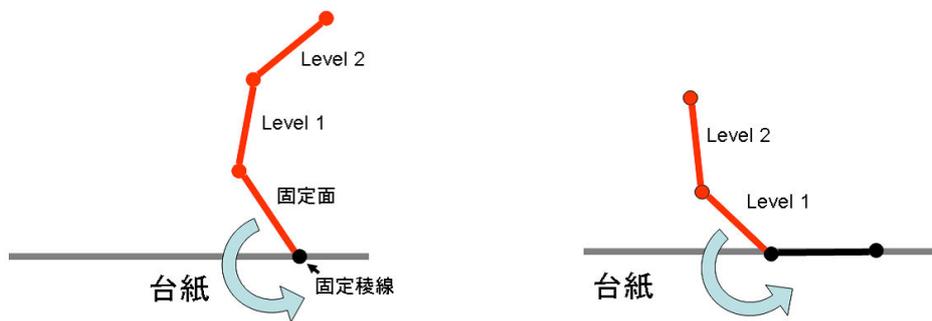
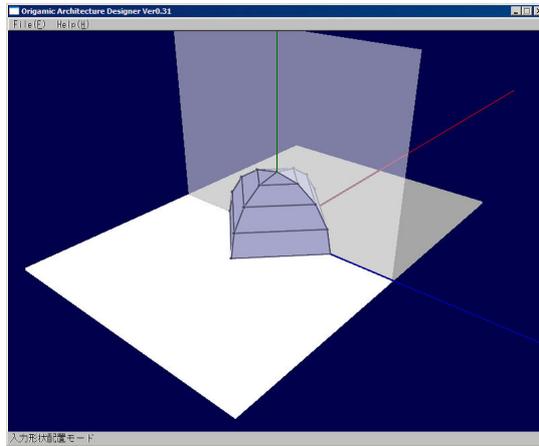


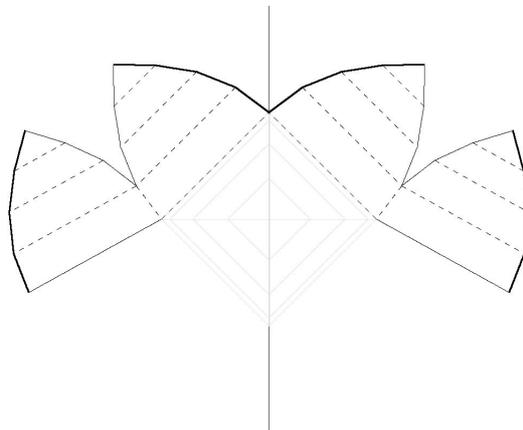
図 4.8: 再帰的な面の回転 (赤い箇所は回転する部分)

4.1.6 形状の4分割

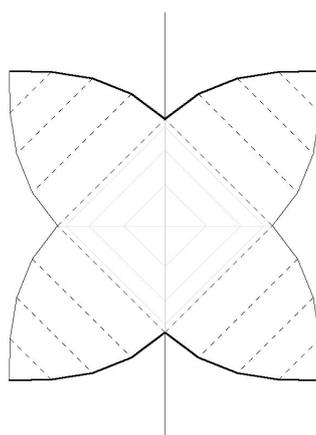
これまで扱ってきた例は形状を左右2分割で表現するものであったが、形状を4分割で表現した方が良い場合もある。図 4.9(a) に示す形状は、固定稜線を左右1本ずつで展開すると図 4.9(b) のようになる。固定稜線を左右2本ずつで展開すると図 4.9(c) のような4分割の展開図になる。組み立てたときの強度の面から、(c) の展開図の方が好ましい。反対に、形状を4分割すると強度が低下してしまう場合もある。本システムは、固定稜線を左右1本ずつにするか2本ずつにするか、ユーザが形状ごとに選択できる。



(a) 元形状



(b) 2分割展開図



(c) 4分割展開図

図 4.9: 2分割展開図と4分割展開図

4.2 実行結果

様々な形状から展開図を生成した結果を図 4.10から図 4.19に示す。

4.2.1 凸形状

四角錐

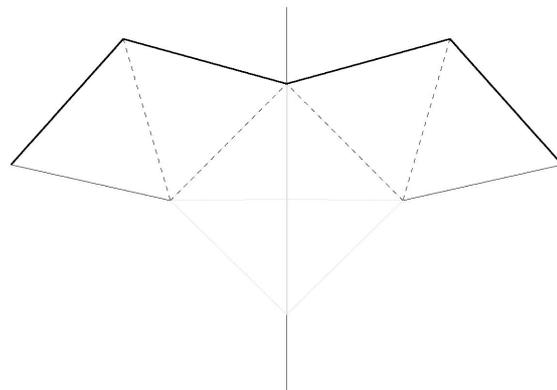
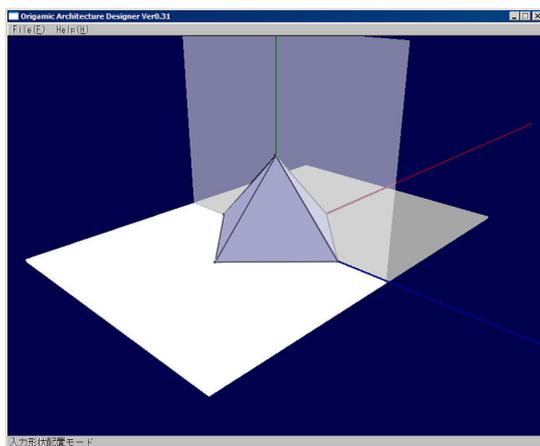


図 4.10: 四角錐

立方体

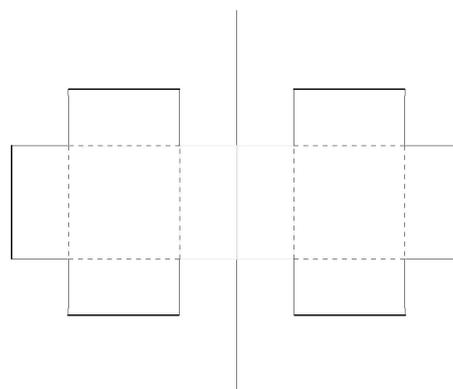
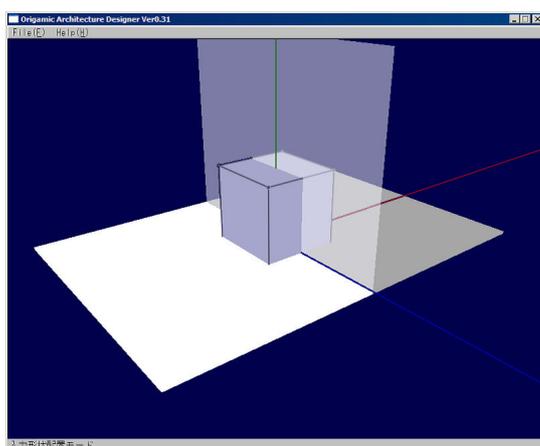


図 4.11: 立方体

半球 (横置き)

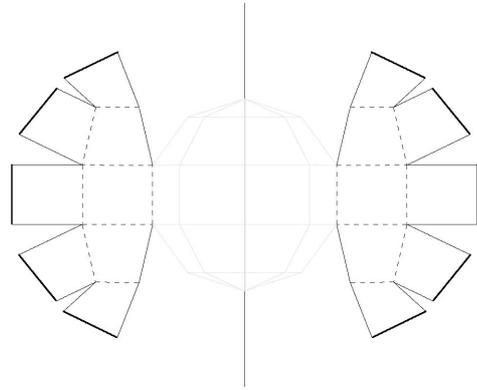
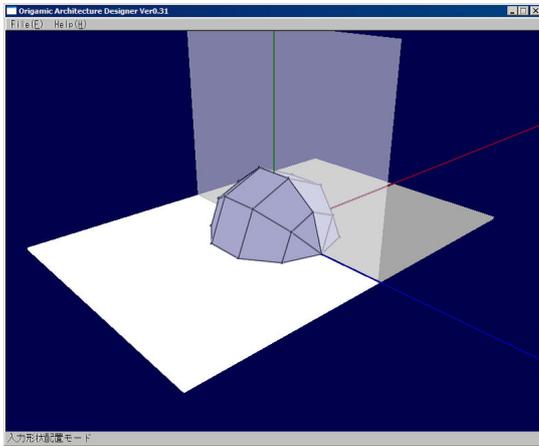


図 4.12: 球 (横置き)

球 (縦置き)

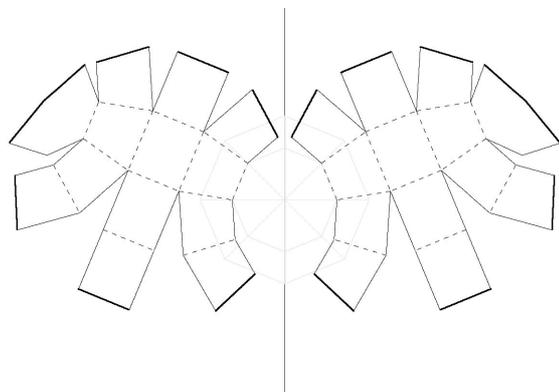
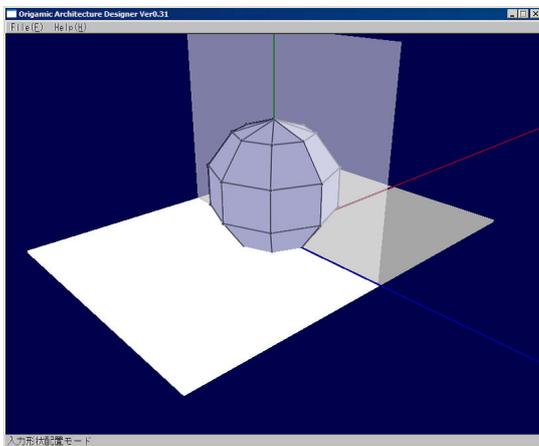


図 4.13: 球 (縦置き)

半球 (ポリゴン数多)

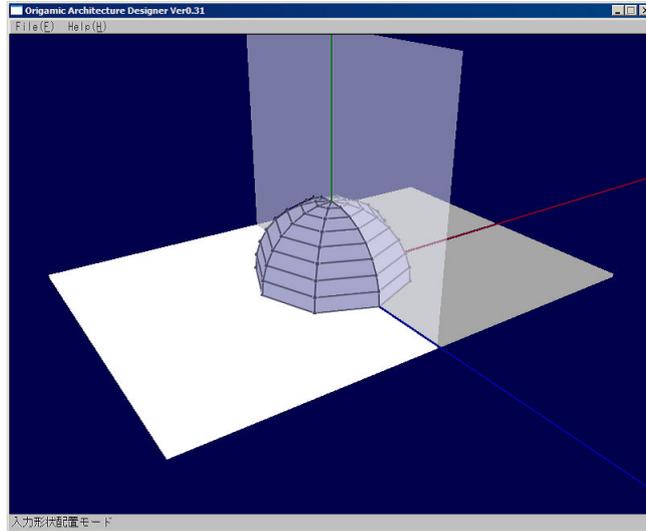


図 4.14: 半球 (ポリゴン数多):元形状

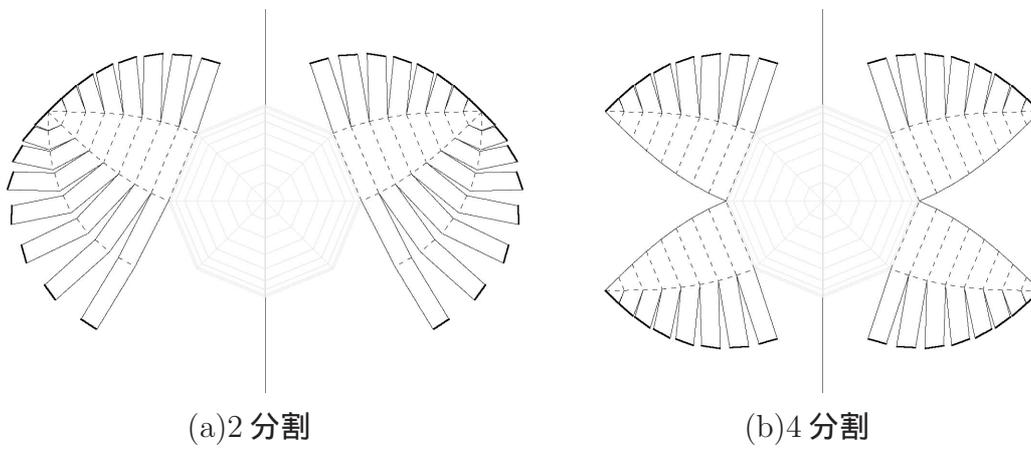


図 4.15: 半球 (ポリゴン数多):展開図

4.2.2 非凸形状

V字型 (非凸形状)

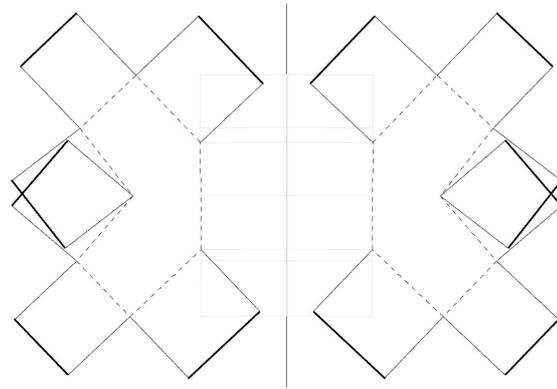
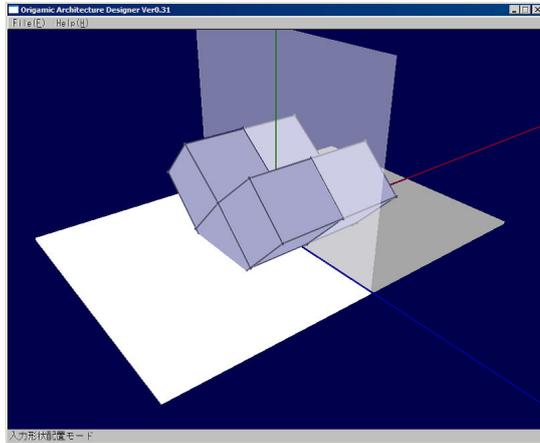


図 4.16: V字型

凹みのある直方体 (非凸形状)

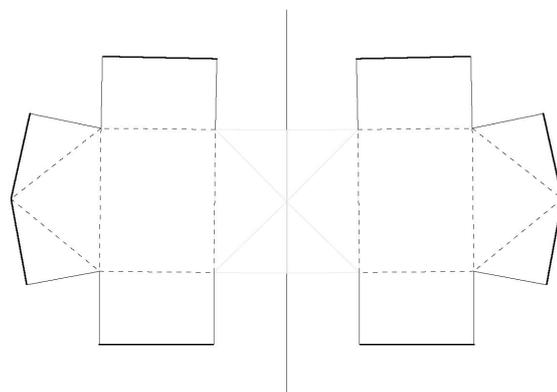
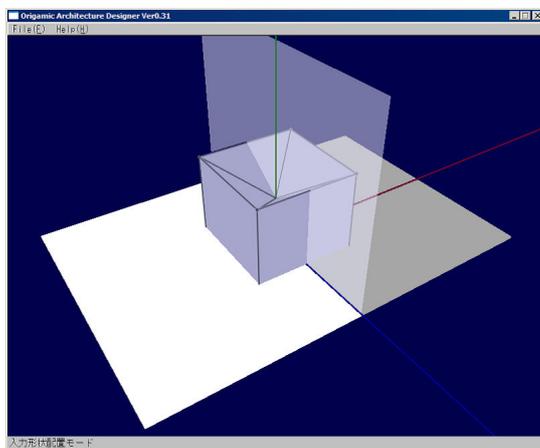


図 4.17: 凹みのある直方体

東京タワー型 (非凸形状)

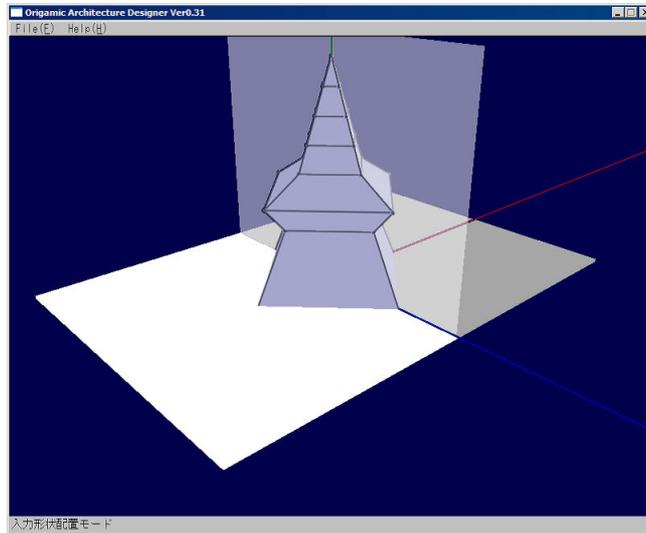


図 4.18: 東京タワー型:元形状

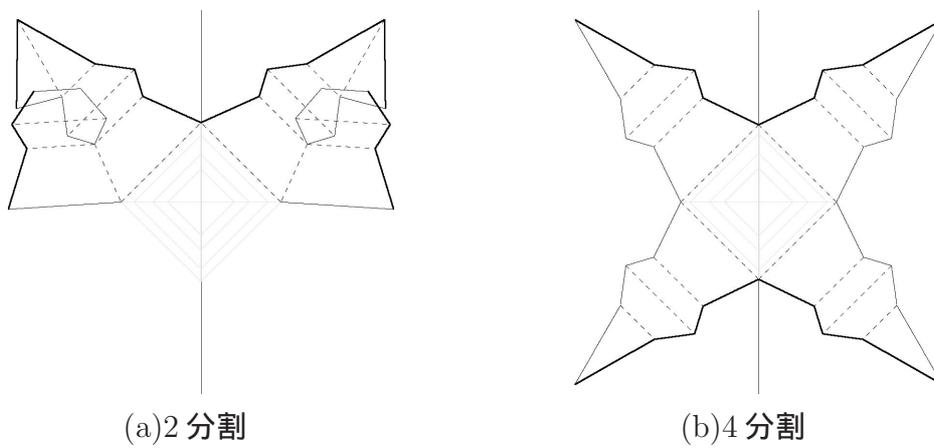


図 4.19: 東京タワー型:展開図

4.3 評価

4.3.1 形状の制約

凸形状に関しては問題なく切り起こし 180 度型折り紙建築の展開図を生成できた。また、形状の 4 分割の効果も確認できた。図 4.14 のような球を固定稜線左右 1 本ずつで展開すると、図 4.15(a) のように展開図上で細長い枝が生じる。固定稜線を左右 2 本に設定した図 4.15(b) の方が枝の長さが短い。4 分割により、より強度のある、組み立てやすい展開図を得ることが出来た。

非凸形状に関しては、展開図において面の重なりが生じる場合や、畳んだときに形状が切り抜き部分に戻らない場合がある。

展開図で面の重なりが生じるケース

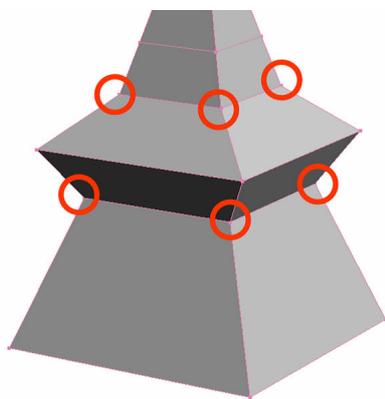
図 4.16 の V 字型は展開図において面の重なりが生じた。図 4.18 の東京タワー型でも図 4.19(a) に示す通り面の重なりが生じた。しかし東京タワー型に関しては、固定稜線数を左右 2 本ずつに設定すると図 4.19(b) のようになり、面の重なりが回避出来た。

完全な凸の箇所、すなわち山折りの稜線がぶつかっている部分は、必ず 1 枚に展開できる。完全な凹、すなわち谷折りの稜線がぶつかっている部分も同様である。面の重なりが生じる可能性があるのは山折りと谷折りがぶつかる箇所である。図 4.20(a) は東京タワー型における山折りと谷折りがぶつかる箇所を示すものである。固定稜線数を左右 2 本ずつに設定して面の重なりが解消できたのは、丸印の箇所が展開図上で分離し、山折りが存在しなくなったことが原因である。図 4.17 の凹みのある直方体も図 4.20(b) に示すとおり山折りと谷折りがぶつかっている箇所が存在する。しかし展開図において面の重なりは生じなかった。山折りと谷折りがぶつかる箇所は面の重なりが生じる可能性があるだけであり、必ず面の重なりが生じるわけではない。

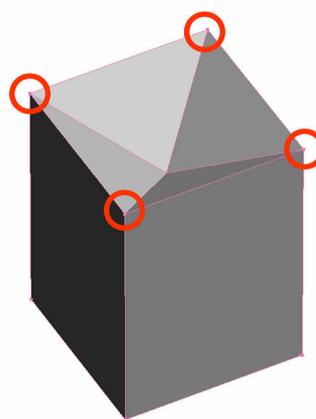
面の重なり回避策としては以下のような案が挙げられるが、実装には至って

いない。

- 親面の決定処理の前に面の重なりの可能性のある箇所を検出し、その箇所を分離するように展開する
- 重なる面のどちらかを省略する
- 重なりの部分で面を分割し、重なっている部分だけ省略する



(a) 東京タワー型



(b) 凹みのある直方体

図 4.20: 山折りと谷折りがぶつかる箇所

畳んだときに形状が切り抜き部分に戻らないケース

図 4.17の凹みのある形状は面の重なりが無い展開図が得られた。しかし、実際に組み立てて折り畳んだ際、形状が切り抜き部分に戻らない。

切り起こし180度型折り紙建築の特長として二つ折りにしたときに厚みが増さないことが挙げられる。これは二つ折りにしたときに形状が広がるように潰れてゆき、最終的には一枚の展開図の状態に戻る事に起因する。しかし、凹の部分に左右から圧迫した場合、内側に向かって潰れる。具体的には図 4.21に示すとおり、形状の左半分に法線方向が右寄りの面、形状の右半分に法線方向が左寄りの面が存在する場合、二つ折りにしたとき形状が広がらない。面对称形状の切り起こし

180度型折り紙建築において、法線方向が右寄りだった面が左向きに、左寄りだった面が右向きに変化するという事は起こりづらい。二つ折りにしたとき、法線方向が右寄りの面は完全に右向きに、法線方向が左寄りの面は完全に左向きになる。

この問題は表現する形そのものに原因があり、展開手法の工夫で解決できるものではない。面の省略や形状の変形などを行って、形状の左半分から右向きの面を無くす必要がある。

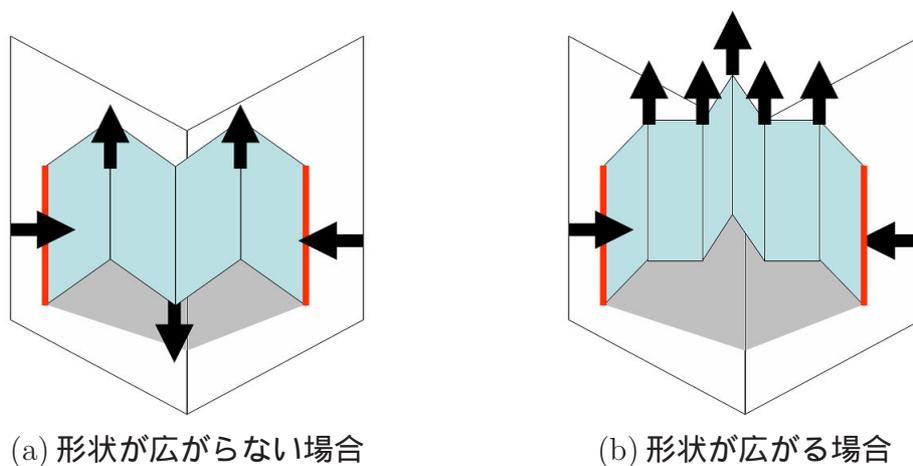


図 4.21: 面の法線方向と形状の潰れ

4.3.2 ポリゴン数の制約

理論上ポリゴン数が多くても展開図生成は可能であるが、実際には処理に時間がかかる。特にバーチャル折り紙建築の開閉処理は非常に重くなる。さらに、ポリゴン数の多い形状は短い稜線が多いため、組み立てに手間がかかるだけでなく、強度が足りず開閉が上手くいかない可能性が高い。ポリゴン数の多い形状に対してはQSlim[22]などのツールを用いて、あらかじめメッシュ簡略化を行っておく必要がある。

第 5 章

まとめ

本研究は、180度型折り紙建築の中でも特に設計が困難な、切り起こし180度型折り紙建築の設計を支援する手法を提案した。面对称形状のポリゴンから、切り起こし180度型折り紙建築の展開図を自動生成する手法を提案した。提案手法については展開図設計支援システムとして実装し、評価を行った。その結果、ポリゴン数の少ない形状に関して切り起こし180度型折り紙建築の展開図を生成できることを確認した。また、展開図における面の重なりを確認することで作品の実現可能性を事前に検証することが可能となった。

本手法によって、ポリゴンモデルから切り起こし180度型折り紙建築の展開図を自動生成できるようになり、展開図設計にかかる時間と試行錯誤の回数の削減を実現した。これにより、制作者の労力や紙のコストを削減できるようになった。

しかし多くの課題が残っている。非凸形状を入力形状とした場合、固定稜線を左右2本ずつ選択しても、展開図上で面の重なりが生じ切り起こし手法で実現できない場合が多い。固定稜線を左右2本にして面の重なりを解消できるのはレアなケースである。実際の折り紙建築で非凸形状を表現している作品の多くは、部分的に面を省略することで面の重なりを回避している。面の省略は非凸形状の展開図作成において非常に有用だが、省略しても良い面、残した方が良い面をどのように判定するかなど、十分に検討する必要がある。非凸形状の扱いに関しては多くの研究の余地が残っている。また、提案手法は表現対象を面对称形状に限定しており、非面对称形状を表現する折り紙建築の展開図は生成できない。しかし、実際には面对称形状以外でも切り起こし手法を用いた折り紙建築で表現可能な場合もある。非面对称形状の取り扱いも今後検討していきたい。

本研究は、情報処理学会 第67回全国大会において“切り起こし180度型折り紙建築の設計支援に関する研究”[23]として発表した内容を含む。

謝辞

本研究を進めるにあたり終始温かいご指導をいただき、学部及び修士課程を通じてお世話になりました渡辺大地講師、和田篤氏に心よりの感謝の意を表します。また、本研究の主査を担当して頂き様々な助言を頂きました若林尚樹教授、副査を担当して頂きました宮岡伸一郎教授、研究開始当初に助言を頂きました故淵上季代絵教授に深く感謝致します。

木原隆明氏には、折り紙建築に関する質問に対し丁寧にご回答頂きました。折り紙建築作家としての貴重なご意見をありがとうございました。ここに深く感謝致します。

最後に、研究生生活において多々お世話になりました事務の方々、東京工科大学の諸先生方と学友に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] David A. Carter , James Diaz, *The Elements of Pop-Up: A Pop-Up Book for Aspiring Paper Engineers*, White Heat Ltd., 1999.
- [2] 茶谷正洋, 折り紙建築 オリガミック・アーキテクチャー, 彰国社, 1983.
- [3] 茶谷正洋, 折り紙建築虎の巻, 彰国社, 1985.
- [4] 茶谷正洋, 折り紙建築型紙集, 彰国社, 1984.
- [5] 茶谷正洋 , 中沢圭子, 折り紙建築 花鳥の巻, 彰国社, 1987.
- [6] 茶谷正洋 , 中沢圭子, 折り紙建築 京の旅, 彰国社, 1994.
- [7] 茶谷正洋 , 中沢圭子, 折り紙建築 世界遺産をつくろう!, 彰国社, 2005.
- [8] M. Chatani, *Pop-Up Origamic Architecture*, Japan Publications, 1985.
- [9] 三谷純, “デジタル時代のペーパークラフト 3. ペーパークラフト作家の世界”, http://www.j-park.net/~mitani/digital_papercraft/docs/3.html.
- [10] 三谷純 , 鈴木宏正 , 木村文彦, “3次元ポリゴンモデルの展開図作成”, グラフィックスとCAD 研究会情報処理学会研究報告 1999-CG-096 , pp.13-18 , 1999.
- [11] 和田弘重 , 高井那美 , 高井昌彰, “組み立ての容易さと曲げ変形を考慮した 3d ポリゴンモデルの展開図生成”, グラフィックスとCAD 研究会情報処理学会研究報告 2003-CG-113 , pp.45-50 , 2003.
- [12] Jun Mitani , Hiromasa Suzuki, “Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding”, *ACM Transactions on Graphics* , Vol.23 , No.3 , pp.259-263 , 2004.
- [13] A. Glassner, “Andrew glassner’s notebook”, *IEEE Computer Graphics and Applications* , Vol.22 , No.1 , pp.79-86 , 2002.

- [14] A. Glassner, “Andrew glassner’s notebook”, IEEE Computer Graphics and Applications , Vol.22 , No.2 , pp.74-85 , 2002.
- [15] 三谷純 , 鈴木宏正 , 宇野弘, “計算機によるボクセルを用いた「折り紙建築」モデルの設計手法”, 情報処理学会論文誌 Vol.44 , No.5 , pp1372-1373 , 2003.
- [16] 三谷純 , 鈴木宏正, “平面多角形の集合による「折り紙建築」モデルの表現と計算機による設計支援”, 情報処理学会論文誌 Vol.45 , No.3 , pp.969-976 , 2004.
- [17] 多摩ソフトウェア有限公司, “ポップアップカードデザイナー”, <http://www.tamasoft.co.jp/craft/popupcard/>.
- [18] 多摩ソフトウェア有限公司, “ポップアップカードデザイナー PRO”, <http://www.tamasoft.co.jp/craft/popupcard-pro/>.
- [19] 三谷純 , 鈴木宏正, “立体断面の格子状組み合わせによる 180 度型折り紙建築模型の設計支援”, 日本図学会 Vol.37 , No.3 , pp3-8 , 2004.
- [20] 茶谷正洋 , 木原隆明, 折り紙建築 世界の名建築をつくる, 彰国社, 1999.
- [21] 渡辺大地, “FK Toolkit System”, <http://www.teu.ac.jp/aqua/~earth/FK/>.
- [22] Michael Garland, “QSlim Simplification Software”, <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/software/qslim.html>.
- [23] 藤原大三郎 , 渡辺大地, “切り起こし 180 度型折り紙建築の設計支援に関する研究”, 情報処理学会 第 67 回全国大会 , 2005.

発表論文

藤原大三郎 , 渡辺大地, “切り起こし 180 度型折り紙建築の設計支援に関する研究”, 情報処理学会 第 67 回全国大会 , 2005.