

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

スリットパターンを用いた板材の湾曲制御と  
形状設計支援ツールの開発

大垣 雅人

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 三谷 純

2018年3月

## 概要

滑らかな曲面を持つ立体構造の設計を支援する研究は数多く行われているが、紙や布などの薄く柔らかい素材で制作することを想定したものが多く、木などの硬い素材での制作に使用することはできなかった。木などの硬い素材を滑らかに曲げる手法として、レーザーカッターを用いて素材にスリットパターンのカットを施すものが知られている。しかし、スリットパターンのカットを施した素材は、そのカット形状の複雑さから、物理的な特性をシミュレーションすることは困難である。そのため、設計した曲面が実際に制作可能かどうかを判定することが難しい。そこで、本研究では、スリットパターンのカットを施した素材を曲げることで得られる曲面の形状に着目し、曲面設計を行う手法を提案した。これにより、スリットパターンのカットを利用した、滑らかな曲面を持つ立体構造を、対話的な操作で設計可能となった。本研究で扱う立体構造は複数の部品から構成され、それぞれの部品は、接合部と呼ばれる部分を組み合わせることで固定される。本研究では、事前にスリットパターンのカットを施した単純な構造を用意し、制作可能な曲面形状を計測した。その後、計測したデータを利用することで、スリットパターンのカットを施した素材を曲げることで得られる曲面に近い形状が設計可能となった。以上の手法を実装したシステムを開発し、硬い素材を用いた滑らかな曲面を持つ立体構造の制作が可能となった。また、システムによって設計された曲面と、実際に制作された曲面の形状の比較を行い、手法の有効性の評価を行った。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	1
1.3	本論文の構成	4
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>6</b>
2.1	素材や構造に関する研究	6
2.2	素材にカットを施した構造に関する研究	8
2.3	可展面設計に関する研究	8
2.4	レーザーカッターを用いたものづくりに関する研究	9
<b>第3章</b>	<b>提案手法</b>	<b>15</b>
3.1	本研究で扱うスリットパターン	16
3.2	平面部品と曲面部品の形状入力	17
3.2.1	平面部品の形状入力	17
3.2.2	曲面部品の形状入力	17
3.3	部品間の接続関係の入力	20
3.3.1	平面部品と曲面部品の接続	20
3.3.2	平面部品同士の接続	22
3.4	サンプルの曲げ形状計測	23
3.5	スリット部分の形状最適化	25
3.6	固定部品の設計	28
3.7	接合部の設計	32
<b>第4章</b>	<b>結果</b>	<b>35</b>
4.1	提案手法による立体構造の試作	35
4.1.1	固定部品のない立体構造	35
4.1.2	固定部品のある立体構造	35
4.2	設計時と制作時のスリット部分の曲げ形状の誤差計測	38
<b>第5章</b>	<b>結論と今後の課題</b>	<b>40</b>
5.1	結論	40
5.2	今後の課題	40

謝辞	43
参考文献	44
付録 A 試作した立体構造の展開図	47

# 目次

1.1	スリットパターンのカットを施した素材の例 . . . . .	2
1.2	本研究で扱う立体構造の例 . . . . .	3
1.3	平面部品の例 . . . . .	4
1.4	曲面部品の例 . . . . .	5
1.5	固定部品の例 . . . . .	5
2.1	Gattas らの手法 [9] で生成される立体構造 (出典 [9]) . . . . .	10
2.2	Ku らの手法 [10] で生成される折り紙の展開図 (出典 [10]) . . . . .	11
2.3	Guseinov らの手法 [11] で生成される曲面 (出典 [11]) . . . . .	11
2.4	Skouras らの手法 [12] で生成される立体構造 (出典 [12]) . . . . .	12
2.5	Ohshima らの手法 [16] で生成される立体構造 (出典 [16]) . . . . .	12
2.6	Zhang らの手法 [22] で生成される立体構造 (出典 [22]) . . . . .	13
2.7	Schwartzburg らの手法 [23] で生成される立体構造 (出典 [23]) . . . . .	13
2.8	Mueller らの手法 [24] による素材加工の様子 (出典 [24]) . . . . .	14
2.9	Beyer らの手法 [25] で生成される立体構造 (出典 [25]) . . . . .	14
3.1	提案手法による立体構造の設計の流れ . . . . .	15
3.2	スリットパターンを表すパラメータ (出典 [14]) . . . . .	16
3.3	平面部品の設計例 . . . . .	17
3.4	設計された曲面部品の例 . . . . .	18
3.5	可展面のパラメータ . . . . .	19
3.6	平面部分のパラメータ . . . . .	19
3.7	$P_{align}$ へ移動後の制御点の例 . . . . .	20
3.8	平面部品と曲面部品の形状修正の例 . . . . .	21
3.9	平面部品同士の接続の例 . . . . .	22
3.10	サンプルの展開図の例 . . . . .	23
3.11	サンプルの曲げ形状の計測 . . . . .	24
3.12	曲線の基準座標系 . . . . .	26
3.13	固定部品で接続する、曲面部品と平面部品のペアの選択 . . . . .	28
3.14	$\theta_{angle}$ の計算例 . . . . .	29
3.15	固定部品に付与される厚みの方向 . . . . .	29
3.16	ray の交点の位置関係の例 . . . . .	30

3.17	固定部品の模式図 . . . . .	30
3.18	平面部品に開ける穴の模式図 . . . . .	31
3.19	固定部品と平面部品を接続した際の断面図 . . . . .	31
3.20	接合部の模式図 . . . . .	32
3.21	接合部の断面図 . . . . .	33
3.22	部品の辺への接合部の付与の例 . . . . .	33
3.23	平面部品同士の接続時における接合部の位置 . . . . .	34
4.1	固定部品のない立体構造の例 . . . . .	36
4.2	固定部品のある立体構造の例 . . . . .	37
4.3	スリット部分の曲げ形状の計測装置 . . . . .	39
5.1	曲面部品の厚みの考慮例 . . . . .	42
5.2	平面部品と曲面部品を接続した展開図の例 . . . . .	42
A.1	図 4.1 上段の展開図 . . . . .	47
A.2	図 4.1 下段の展開図 . . . . .	47
A.3	図 4.2 上段の展開図 . . . . .	48
A.4	図 4.2 下段の展開図 . . . . .	48

# 表 目 次

4.1 設計時と制作時のスリット部分の曲げ形状誤差 . . . . .	38
-------------------------------------	----

# 第1章 序論

本章では、まず研究の背景と目的を述べ、その後本論文の構成を述べる。

## 1.1 研究の背景

デジタルファブリケーションとは、計算機上のデータを利用してものづくりを行う技術である。近年、3Dプリンターやレーザーカッターが普及し、一般の人々が利用できる環境が整備されている。これにより、単純な素材の加工では制作できない作品を作れるようになった。

デジタルファブリケーションによるものづくりの利点として、素材や加工方法を工夫することで、制作物に様々な特性を与えられることが挙げられる。素材に特性を与えるための加工方法の一つとして、図 1.1 のように、レーザーカッターを用いて素材にスリットパターンのカットを施す手法が知られている。従来のものでものでは、硬い素材で滑らかな曲面を作る際には、部品の切断以外にも特殊な加工を必要とする。例としては、アクリル加工における加熱 [1] や金属のプレス加工 [2] やハンマーによる打ち出し [3] などが挙げられる。しかし、このカットを素材に施すことで、切断以外の加工を必要とせずに木などの硬い素材を滑らかに曲げられるため、曲面を含む作品を作れる。このようなスリットパターンによる曲面は、玩具 [4] や梱包材 [5] のデザインにも応用されている。

デジタルファブリケーションによるものづくりを行うためには、3Dプリンターなどの加工機器に入力するデータを用意する必要がある。しかし、データの作成は試行錯誤を伴う作業であり、加工機器や材料に対する知識や経験が必要となる。スリットパターンによる曲面制作においては、カットを施した素材についての知識が必要となるが、その形状の複雑さから、カットを施した素材の物理的な特性は明らかになっていない。そのため、素材を曲げた際にどのような形状となるか、素材が破損せずにどの程度まで曲げられるか、などを調べるのは困難である。よって、カットを施した素材に対応した曲面の設計手法の確立と、加工機器に入力するデータの作成支援が求められる。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、スリットパターンのカットを利用した、滑らかな曲面を持つ立体構造の設計手法を提案することである。

本研究で扱う立体構造は、図 1.2 で示すようなものであり、平面部品、曲面部品、固定部品の3種類の部品を組み合わせることで構成されるものとする。提案手法では、カットを施し



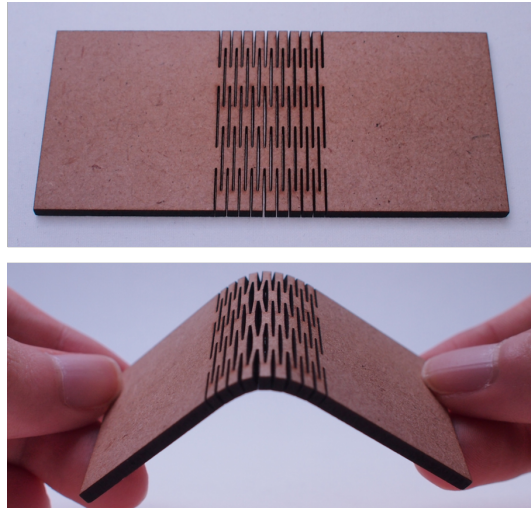


図 1.1: スリットパターンのカットを施した素材の例。上図はカットを施した素材であり、下図は素材を手で曲げた様子である。

た部品の形状を固定するため、カットを施さない部品を接続している。ここでは、各部品の構成について説明する。

### 平面部品

平面部品は、図 1.3 のように、スリットパターンのカットを含まない、平面の部品である。平面部品の形状は任意の多角形とし、頂点と、頂点間を結ぶ辺で表現する。一部の辺には接合部と呼ばれる部分を設け、曲面部品の接合部と接続することで部品同士を固定する。また、部品内部に穴を開けることで、後述する固定部品の接続に利用する。

### 曲面部品

曲面部品は、図 1.4 のように、スリットパターンのカットを施すことで、曲げられるようにした部品である。曲面部品の形状は長方形であり、カットを含まない平面部分と、カットを含むスリット部分が交互に連結した構造とする。各平面部分には接合部があり、部品両端の平面部分の接合部は前述した平面部分との接続に利用する。両端以外の平面部分の接合部は、後述する固定部品の接続に利用する。

### 固定部品

固定部品は、図 1.5 に示す部品である。スリットパターンのカットを含めず、平面部品とは異なり、形状を四角形に限定する。固定部品は、曲面部品の平面部分を固定することで、曲

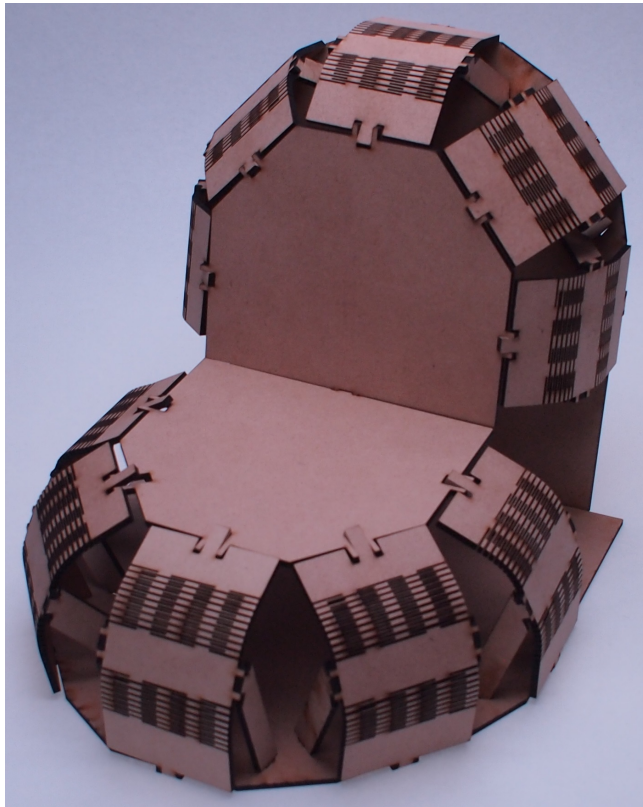


図 1.2: 本研究で扱う立体構造の例

面部品全体の形状を固定する。固定部品の1対辺には爪と接合部を設け、それぞれ、平面部品の穴と、曲面部品の両端以外の平面部分にある接合部と接続する。

提案手法では、事前にサンプルとして、スリットパターンのカットを施した構造をいくつか用意する。そして、サンプルを様々な角度に曲げた際の形状を計測し、得られたデータを曲面部品の設計に利用する。ユーザはスクリーン上をマウスでクリックすることで各部品の形状や、部品間の接続関係を入力する。その後、展開図と呼ばれる、レーザーカッターに入力するための各部品の形状データが出力される。ユーザは、レーザーカッターを用いて素材を切断して得た各部品を組み立てることで、設計した立体構造を実際に制作できる。提案手法により、以前は試作を繰り返すことで行っていた設計作業を、計算機上の操作で行うことができる。

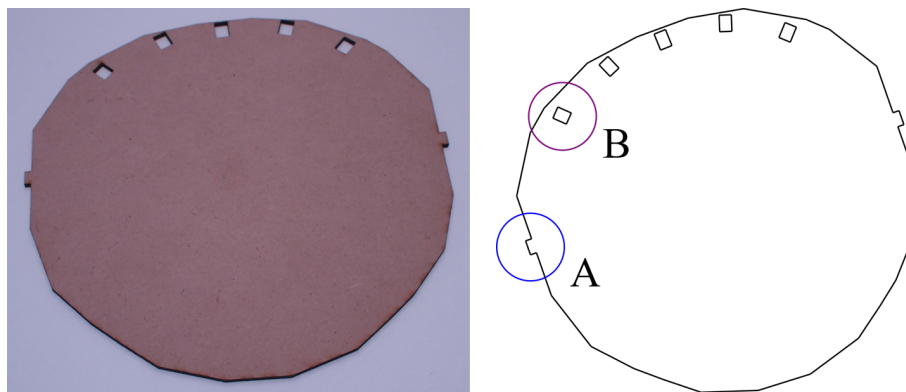


図 1.3: 平面部品の例。左図は制作した平面部品であり、右図は平面部品の図面である。図中の A は接合部を示し、B は固定部品を接続する穴を示す。

### 1.3 本論文の構成

第 1 章では本研究の背景と目的について述べた。第 2 章では関連研究、第 3 章では本研究の提案手法、第 4 章では実験の結果と考察、第 5 章では結論と今後の課題を述べる。

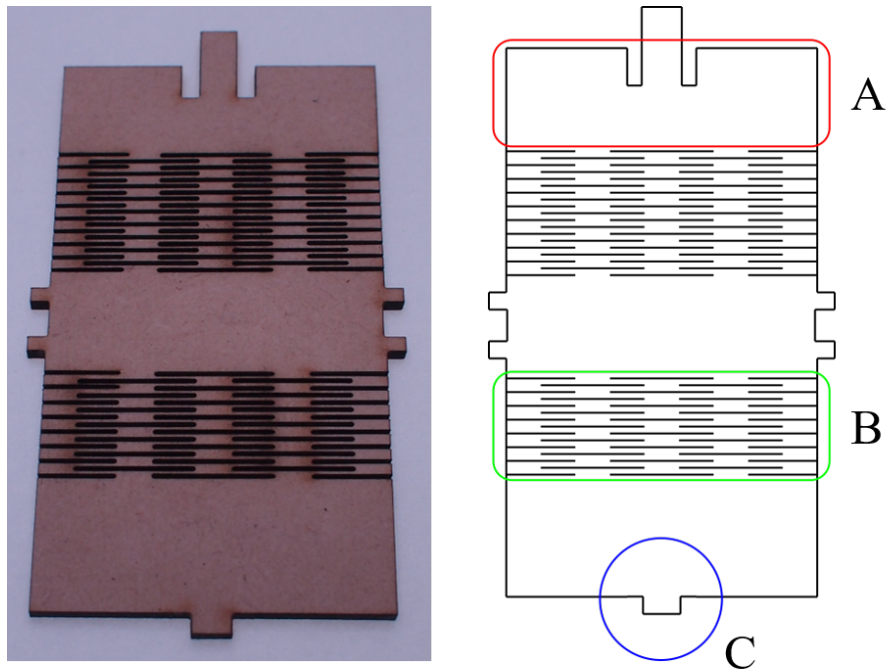


図 1.4: 曲面部品の例。左図は制作した曲面部品であり、右図は曲面部品の図面である。図中の A は平面部分を示し、B はスリット部分を示す。C は接合部を示す。

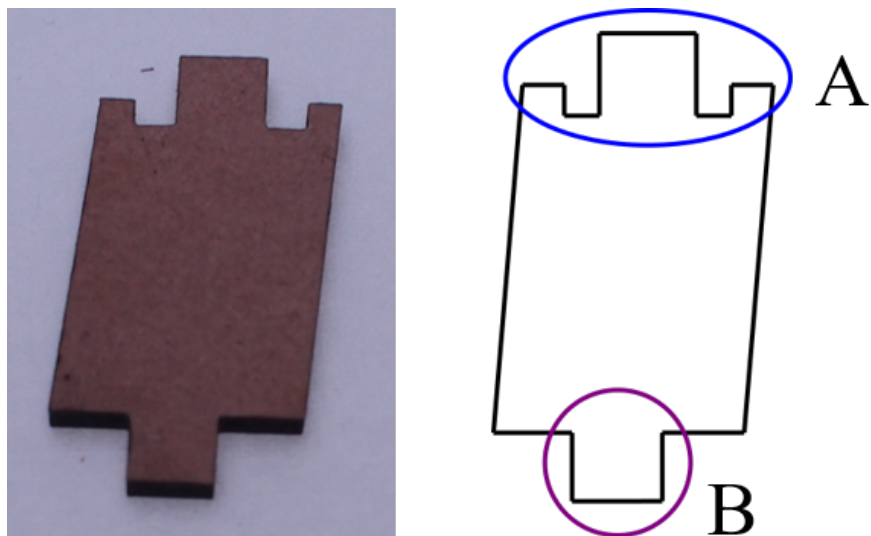


図 1.5: 固定部品の例。左図は制作した固定部品であり、右図は固定部品の図面である。図中の A は接合部を示し、B は平面部品に接続する爪を示す。

## 第2章 関連研究

滑らかな曲面を含む立体構造を作るために、素材や設計手法などの様々な要素に対して研究が行われている。本章では、曲面制作や立体制作の各要素に関する研究の中で、本研究に関連するものを紹介する。

まず、2.1節では、曲面を制作するための材料や構造を提案した研究を紹介する。これまで、特別な加工を用いずに滑らかな曲面を制作するためには、紙や布などの薄く柔らかい素材を用いる必要があった。そこで、制作物に剛性など様々な特性を付与するため、紙や布以外の材料や、特定の構造を用いて曲面を制作する研究が行われるようになった。

2.2節では、素材にカットを施した構造に関する研究を紹介する。素材にカットを施すことで剛性を変化させることができる。本研究では、1.1節で示したスリットパターンを用いることで曲面を制作している。

2.3節では、計算機上で曲面を設計する手法に関する研究を紹介する。曲面を設計する際には、加工する素材や加工手法を考慮する必要がある。3.1節で後述するように、本研究では、曲面部品のスリット部分の曲げは切断線に対して垂直な方向に限定される。このとき、スリット部分を曲げて作られる曲面の形状は、可展面と呼ばれる曲面に限定される。可展面は、1枚の平面を伸縮させることなく曲げるだけで作られる曲面である。2.3節では、可展面の形状の制約を考慮した、曲面設計の手法について紹介する。

2.4節では、レーザーカッターを用いたものづくりに関する研究を紹介する。レーザーカッターは木やアクリルなど様々な素材を切断できる。また、計算機上のデータとして切断形状を入力するため、細かな形状や複雑なデザインの加工が行える。そのため、レーザーカッターの特性を生かして新たな作品が作られている。

### 2.1 素材や構造に関する研究

計算機による立体構造の設計支援は多くの分野で研究されてきた。折り紙や紙模型の設計においては、従来は試行錯誤が伴う手作業であった設計工程を容易にするための手法が提案されている。特に、滑らかな曲面の集合で立体を設計する手法 [6, 7] は、制作可能な形状の種類を増やすことに貢献している。しかし、これらの手法で扱う曲面は、平面に展開可能であるという制約しか持たない。そのため、曲面の形状と素材の組み合わせによっては、加熱や打ち出しなどの特別な加工を素材に加えなければ制作できない問題がある。そこで、特別な加工を用いず、素材や構造の特徴を利用して曲面制作や折り曲げを行う研究 [8, 9, 10, 11, 12] がある。

- Perumal らは、剛性の異なる複数の素材を張り合わせたシートで立体構造を制作する手法を提案した [8]。レーザーカッターなどでシートを切断する際に、特定の層のみを残して切断することで、曲げられない部分、緩い曲げが可能な部分、鋭い折りが可能な部分を 1 枚のシートで制作できる。切断する層の選択は、レーザーカッターの出力を調整することで行う。また、シートの切断線の幅を変えることで、シートを曲げられる最大の角度を制御できる。設計用のインタフェースでは、切断する形状を選択する際に、各辺の切断する層や曲げ角度を指定することで、用途に合わせた形状データが出力される。
- Gattas らは、ミウラ折り [13] などの折り紙の構造を利用して、曲面構造を制作する手法を提案した [9]。制作する構造は図 2.1 のように、表面、コア部分、裏面の 3 種類の部品で構成されており、それぞれの部品は平面に展開できる。この手法では、制作したい曲面の内径、概形、中心角、分割数などのパラメータから、曲面に適したコア部分の折り構造を求める。その後、コア部分の形状から、表面、裏面のそれぞれと接触する部分を計算し、各部品同士を接合するための爪を配置する。各部品を接合したモジュールを複数組み合わせることで曲面構造を制作する。
- Ku らは、厚みのある素材を折り紙のように折るための手法を提案した [10]。この手法では、厚みのある素材を折るために、折り目をヒンジに置き換えた展開図を設計する。薄い紙などで用いる通常の折り紙の展開図を厚みのある素材のための展開図に置き換える手法には様々なものがある。しかし、それらの手法には既存の折り紙の展開図を流用できないことや、制作が困難な構造となる問題がある。この手法では、図 2.2 のように、1 本の折り線を 2 か所のヒンジに置き換えることで、厚みのある素材のための展開図としている。
- Guseinov らは、2 枚の弾性シートを引き延ばしタイルの両面に接着することで、シートの弾性力でタイルが変形し、曲面を制作する手法を提案した [11](図 2.3)。この手法では、入力された 3 次元形状をメッシュ化した後、平面にマッピングする。その後、シートが縮む際に働く力を考慮しタイルの形状を最適化する。この手法では、伸縮性のある素材を利用することで、単に素材を曲げるだけでは制作できない、球体などの曲面を制作できる。
- Skouras らは、四角形の同じ形状のパーツを組み合わせて立体構造を制作する手法を提案した [12](図 2.4)。立体構造の形状はパーツの組み合わせ方によって変化するため、この手法では設計用のインタフェースを開発する。パーツが組み合わさった形状を表現するデータ構造を設計し、その後、各パーツの変形を計算することで立体構造全体の形状を求める。ユーザは単純な立体形状の押し出しや、マージをすることで立体構造を設計できる。

提案手法では、単一の板状の素材にスリットパターンのカットを施すことで、素材を曲げ曲面を制作する。また、各部品同士を接合部で接続することで曲面部品の形状を固定し、立体構造全体の形状を決定する。

## 2.2 素材にカットを施した構造に関する研究

カットを施した素材は物理的な特性が明らかになっていないため、形状の設計が困難である。そのため、カットを施した素材の特性についての調査 [14, 15] や、曲面形状の設計手法に関する研究 [16] が行われている。

- Ohshima らは、本研究で扱うものと同様のスリットパターンを施した構造に力を加えた際の弾性特性を表す、解析モデルを提案した [14]。スリットパターンを施した構造を梁の集合と考え、曲げやねじりなど4種類の変形に対する剛性を調べた。この手法では、スリットパターンの各部分が曲がる際の角度は全て等しいという仮定をおくため、実際の変形とは異なる結果となることがある。一方、本研究では、スリットパターンの曲がり方に仮定を設定せず、実際に計測した形状を元に曲面設計を行う。
- Güzelci らは、様々な形状のカットパターンを素材に施し、素材に力を加えた際の曲がり方を調べることで、曲面設計に利用する手法を提案した [15]。曲面を設計する際は、求める曲面の各部分における曲率を調べ、曲率が大きく変化する部分に細かいカットパターンを配置する。一方で、曲率の変化が小さい部分では荒いカットパターンを配置し、カットパターンの細かさで素材の曲がり方を制御している。この手法では、入力した曲面形状に合わせた、カットパターンの配置を求められるが、どのような曲面形状を制作可能かについては求められない。一方、本研究では、どのような曲面形状を制作可能かを求めることを目的としている。
- Ohshima らは、入力されたパラメトリック曲線から、スリットパターンを含む立体構造を設計する手法を提案した [16]。この研究で制作する立体構造は、図 2.5 のような、曲線を掃引したような形状となる。この研究では、カットを施した素材を変形した際の断面形状は円弧曲線で表されると仮定し、入力曲線を円弧曲線の集合で近似することで制作する立体構造の形状を決定している。本研究では、サンプルを実際に曲げた際の形状を設計に利用するため、円弧曲線の集合では表現できない断面形状への変形を扱うことができる。Ohshima らの手法で制作可能な構造は、図 2.5 のような、曲面を2枚の平面で挟むことで形状を固定するものに限られる。一方本研究では、カットを施した部分を直接固定することなく曲面を作るため、より自由度の高い制作が可能である。

## 2.3 可展面設計に関する研究

2.1 節で述べたように、滑らかな曲面の設計は、立体制作において重要な要素である。特に、平面を伸縮させずに曲げることで得られる可展面の設計手法は、船体 [17] や衣服 [18] など、産業分野においても活用されている。しかし、形状モデリング用のアプリケーションでの可展面設計は、可展面の性質に関する知識が必要であり、経験のない人には困難である。そのため、可展面の設計を支援するための研究 [19, 20, 21] が行われている。

- Tang らは、曲面の輪郭線をスプライン曲線と考えることで可展面を表現する手法を提案した [19]。この手法では、曲面が可展面となるとき、各辺のスプライン曲線の形状の条件を二次方程式として表現する。また、双対表現を利用することで、複数の可展面が滑らかに接続したような複雑な形状の編集を対話的に行える。この手法では、曲面の輪郭線を編集することで可展面の形状を設計することから、折り線が曲線となるような折り紙のモデリングも可能である。
- 細田らは、3次ベジェ曲線を可展面の測地線として入力することで、可展面を設計する手法を提案した [20]。また、紙模型の展開図の設計に特化した機能として、可展面同士の間で可展面を切断できる。これにより、紙模型の展開図を自動生成する従来手法では困難であった、意匠性を考慮した曲面配置が可能となった。
- Zhu らは、平面を折るだけでなく、緩く滑らかに折った際の3次元形状をモデリングする手法を提案した [21]。ユーザは、平面上に折り線と折り角度、折りの鋭さを入力する。その後、平面をメッシュ化し、折りの鋭さに合わせて折りが影響を与える範囲をメッシュ上にマッピングする。最後に、それぞれの折りの影響を足し合わせることで3次元形状を求める。この手法では、厳密な可展性は保証されないが、物理シミュレーションと組み合わせることで、平面を折り曲げた際の伸縮を抑えることができる。

第3章で後述するが、本研究では細田らの手法 [20] を元に、曲面部品のスリット部分が作る曲面を設計する。本研究では、カットを施した部品の設計に特化した機能として、事前にサンプルを曲げて作られる曲面形状を調べることで、設計可能な可展面の形状に制約を加える。

## 2.4 レーザーカッターを用いたものづくりに関する研究

レーザーカッターによる加工は、素材を切断することで行う。そのため、3Dプリンターのような素材を積み上げる方法と比べ、加工時間が短い利点がある [8]。このことから、レーザーカッターで切断可能な板状の素材を用いて、様々な特性を持つ立体構造を制作する手法 [22, 23, 24, 25] が提案されている。

- Zhang らは、平面を折り曲げて組み立てた立体部品をジョイントでつなぐことで、各部品を動かせる構造 (図 2.6) を設計する手法を提案した [22]。各部品の形状は、既存の立体モデルを近似することにより自動で設計される。ユーザは各部品が動く際の回転軸と動く範囲を指定する。その後、部品同士が干渉しないように、自動的に部品の形状が修正される。
- Schwartzburg らは、スリットを配置した平面部品同士を組み合わせることで組み立てる立体構造 (図 2.7) の設計手法を提案した [23]。各部品の形状を表す平面の集合を入力とし、部品の交差する角度から、各部品が固定されるようなスリット形状を求める。この手法では、部品同士の接続関係をグラフ構造で扱うことで、立体構造の組み立て可能性を判定する。



- Muellerらは、レーザーカッターによる素材の加工で、切断と曲げを同時に行う手法を提案した [24]。レーザーカッターを焦点から離れた位置で照射することで、素材に加わる熱を分散させることができる。これにより、素材の一部を柔軟にすることで、図 2.8 のように重力によって素材を曲げる。
- Beyerらは、既存の立体モデルから、3D プリンターとレーザーカッターで制作する部品の形状データを設計する手法を提案した [25]。ユーザは、制作物の複雑さと制作時間のどちらに重点を置くかを選択する。その結果、各部品の制作手法が自動的に決定され、制作手法に対応した、加工機器へ入力するデータが出力される。ユーザは、設計の各段階に応じて制作物の複雑さを選択する (図 2.9) ことで、制作物の確認にかかる時間を短縮できる。

Beyerらの手法と同様に、本研究が対象とする立体構造の制作手法は、立体物の制作時間の短縮に貢献できると考えられる。Beyerらの手法では、入力された立体モデル内の曲面をスリットパターンに置き換える。一方本研究では、スリットパターンのカットを施した素材で制作可能な曲面形状を調べることで、対話的な立体設計を可能にする。

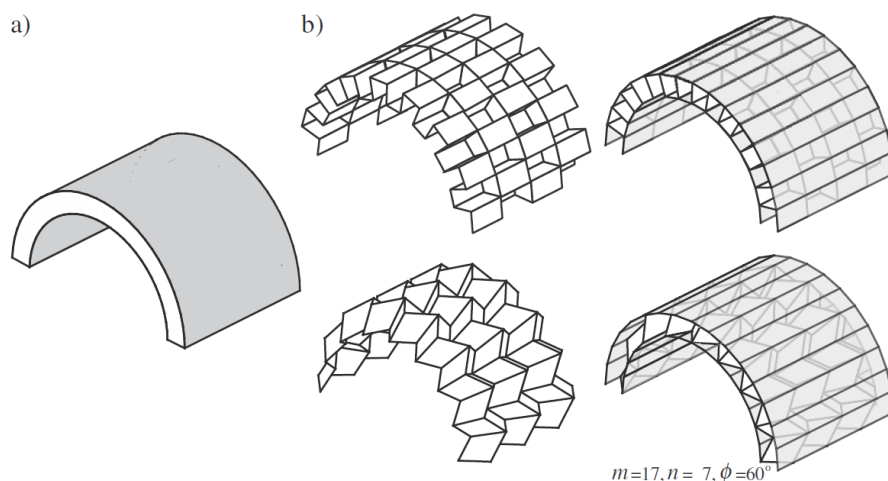


図 2.1: Gattas らの手法 [9] で生成される立体構造 (出典 [9])。左図は入力形状であり、中央図は入力形状に合わせて設計されたコア部分である。右図はコア部分に表面と裏面を接合した構造である。

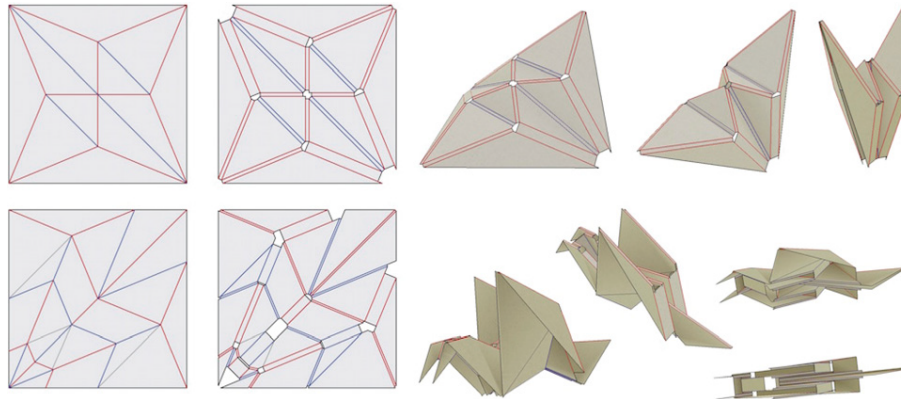


図 2.2: Ku らの手法 [10] で生成される折り紙の展開図 (出典 [10])。左図は素材の厚みを考慮しない場合の展開図、中央図は素材の厚みを考慮した展開図である。右図は中央図の展開図を折った様子である。

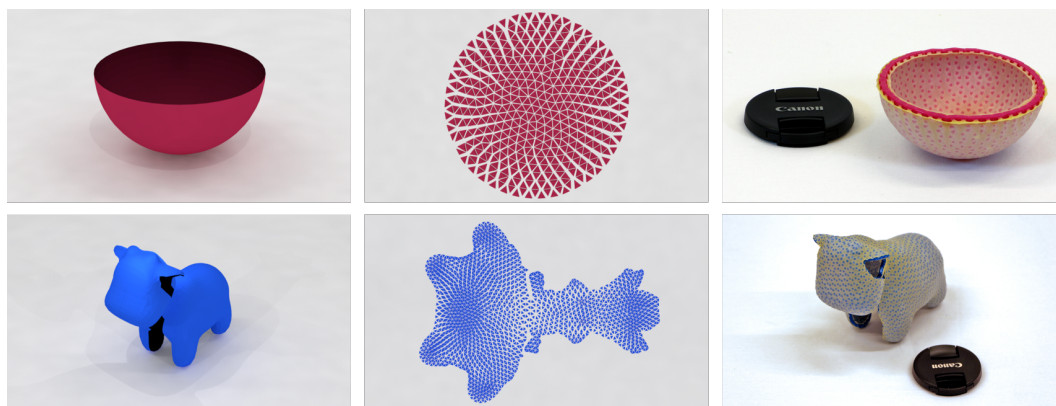


図 2.3: Guseinov らの手法 [11] で生成される曲面 (出典 [11])。左図は入力形状であり、中央図は設計されたタイルの形状である。右図はタイルに弾性シートを張り付けて制作した曲面である。

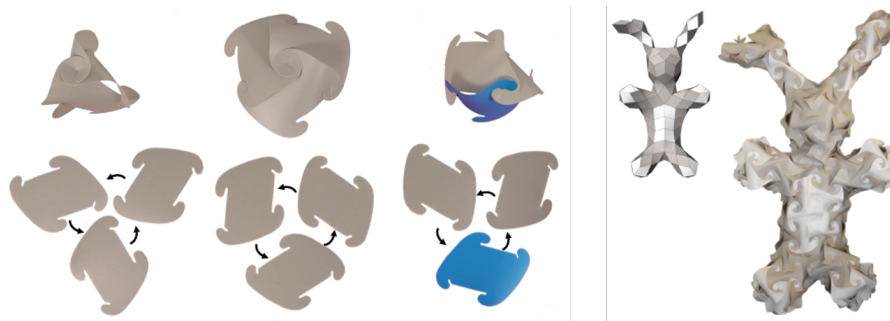


図 2.4: Skouras らの手法 [12] で生成される立体構造 (出典 [12])。左図はパーツの組み合わせ方による立体形状の変化を示す。右図は設計インタフェース上での立体構造の形状と制作物である。



図 2.5: Ohshima らの手法 [16] で生成される立体構造 (出典 [16])



図 2.6: Zhang らの手法 [22] で生成される立体構造 (出典 [22])。左図は入力された立体モデルであり、右図は生成された部品を組み立てて制作された立体構造である。



図 2.7: Schwartzburg らの手法 [23] で生成される立体構造 (出典 [23])。左図は生成された立体構造であり、右図は各部品の形状を表す。

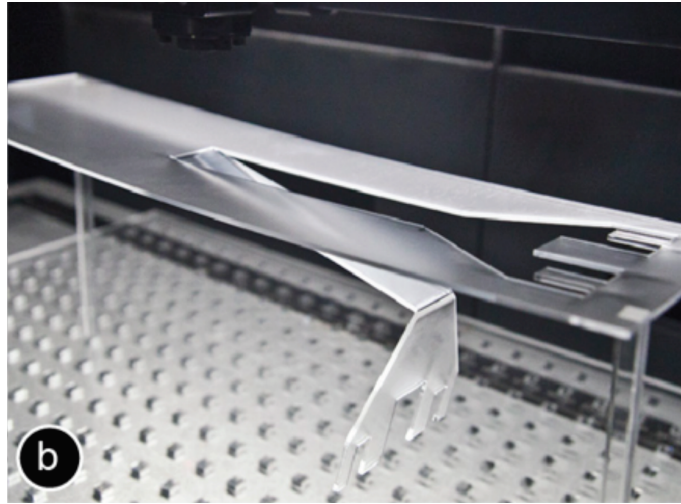


図 2.8: Mueller らの手法 [24] による素材加工の様子 (出典 [24])

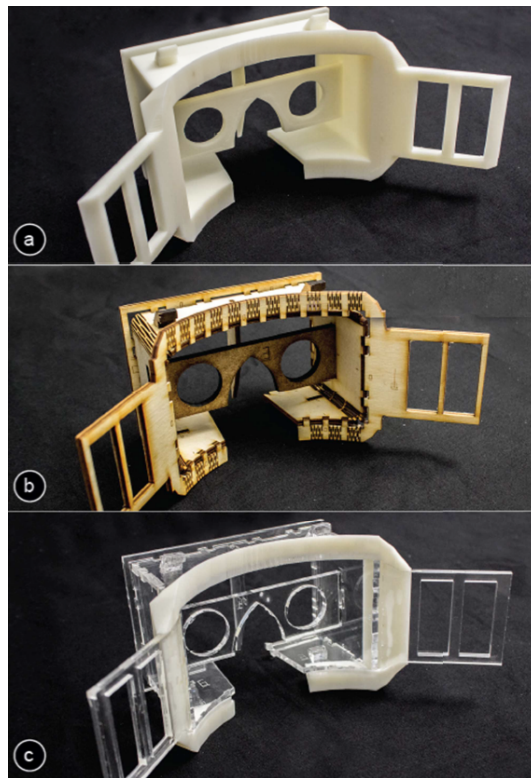


図 2.9: Beyer らの手法 [25] で生成される立体構造 (出典 [25])。上図は立体全体を 3D プリンターで制作しており、中央図は木材をカットした部品で制作している。下図は 3D プリンターで制作した部品とアクリルをカットした部品を組み合わせている。

### 第3章 提案手法

本章では、まず本研究で扱うスリットパターンの定義について3.1節で述べる。その後、提案手法による立体構造の設計について3.2節より述べる。まず平面部品と曲面部品の形状を入力する手順を3.2節で述べる。次に、部品を組み立てる際に、部品間の接続関係を指定する手法を3.3節で述べる。そして、事前に測定したサンプルの曲げ形状を利用して、曲面部品のスリット部分の形状を最適化する手法を3.4、3.5節で述べる。最後に、各部品間を接続するための接合部を設計する手順や、曲面部品の形状を固定するための固定部品の設計手法について3.6、3.7節で述べる。

本手法による立体構造の設計は図3.1で示す手順で行う。各手順の詳細は3.2節から述べる。

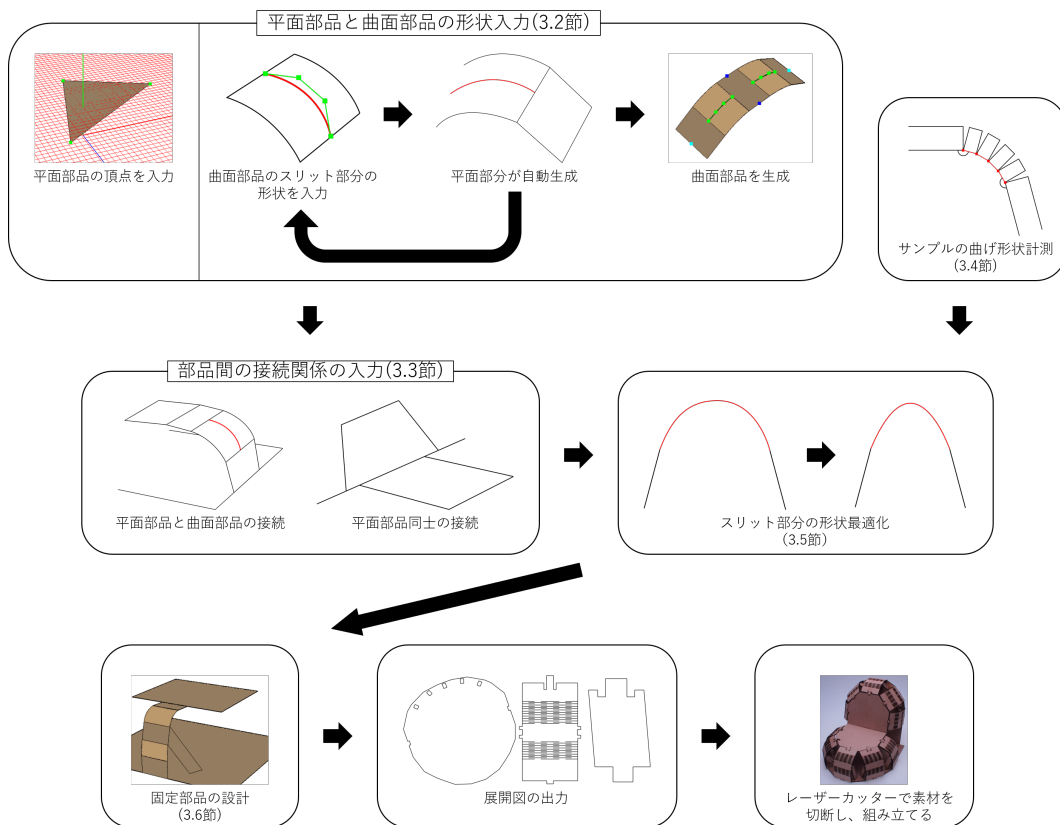


図 3.1: 提案手法による立体構造の設計の流れ

### 3.1 本研究で扱うスリットパターン

本研究で扱うスリットパターンを図 3.2 に示す。本研究では、切断線に平行な方向を幅方向、切断線に垂直な方向を長さ方向と呼ぶ。また、Ohshima らの論文 [14] に従い、スリットパターンを以下に示すパラメータで表す。

- $a$  : スリットの長さ方向の間隔
- $b$  : 素材の厚さ
- $g$  : 切断線の幅
- $l$  : 切断部分の幅
- $m$  : 切断線の長さ方向の本数
- $n$  : 切断部分の幅方向の本数
- $s$  : スリットの幅方向の間隔
- $A$  : スリットパターン全体の幅
- $L$  : スリットパターン全体の長さ

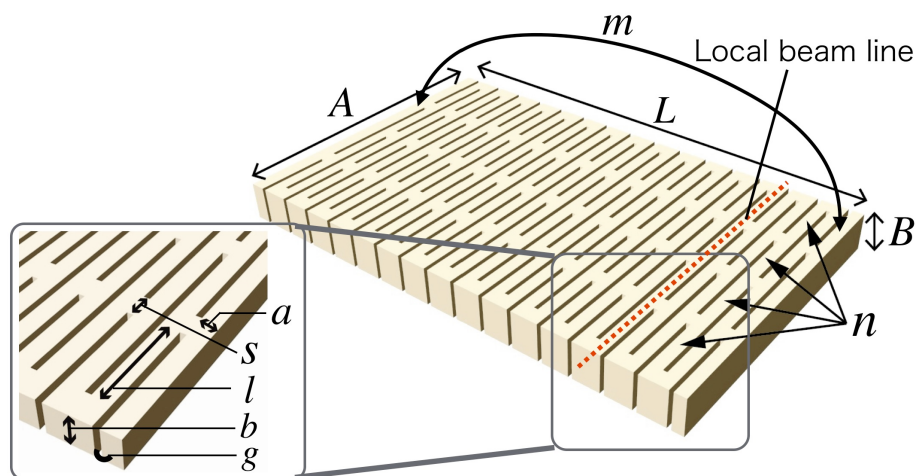


図 3.2: スリットパターンを表すパラメータ (出典 [14])

このとき、スリットパターン全体の幅は  $A = nl + (n + 1)s$  で表され、長さは  $L = m(a + g)$  で表される。

また、本研究ではスリットの曲げ操作は、スリットの長さ方向への曲げに限定し、ねじりを加えないものとする。

## 3.2 平面部品と曲面部品の形状入力

ユーザはまず、以下に述べる方法で平面部品と曲面部品の形状を入力する。

### 3.2.1 平面部品の形状入力

平面部品の形状は、図 3.3 に示すように、平面上に多角形の頂点を入力することによって行う。まず、ユーザは平面部品が乗る平面を空間上に配置する。このとき配置される平面を、基準平面と呼ぶ。配置された基準平面は、ユーザの操作によって位置や向きを変更できる。基準平面の位置と向きを決定後、ユーザは基準平面上をマウスでクリックすることで、平面部品の形状を入力する。基準平面上に入力される平面部品の頂点は、平面部品の表面を表す。そのため、基準平面の法線とは逆方向に平面部品の厚みが付与される。

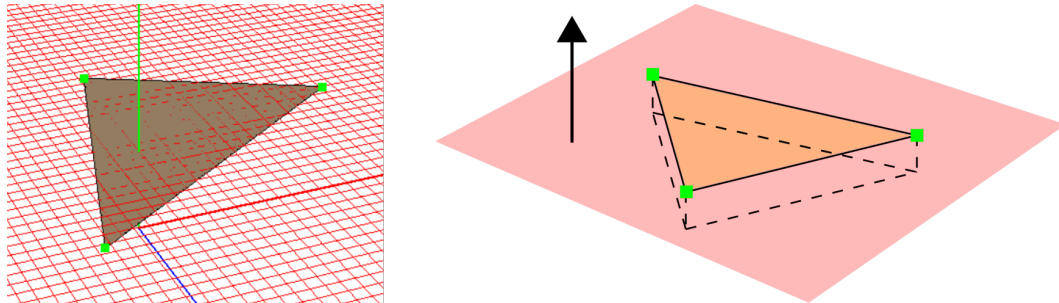


図 3.3: 平面部品の設計例。左図は、インタフェース上での設計例である。赤色のワイヤフレームで表す平面は、基準平面である。ユーザは、多角形の頂点(緑色の点)を入力することで平面部品を設計する。右図は、入力された平面部品の形状に厚みを付与した例である。黒矢印は基準平面の法線方向を示す。

### 3.2.2 曲面部品の形状入力

提案手法では、図 3.4 に示すように、曲面部品を平面と可展面が連結したデータ構造で扱い、平面は平面部分、可展面はスリット部分をそれぞれ表す。スリット部分を表す可展面の設計には、細田らの手法 [20] を用いる。

提案手法では、細田らの手法と同様に、可展面の設計にリファレンスモデルを利用する。リファレンスモデルとは、目的の曲面形状を設計するための目安となる、既存の立体モデルである。ユーザがリファレンスモデル上をマウスでクリックすると、その座標に 3 次ベジェ曲線の制御点が配置される。制御点を 4 個配置すると、3 次ベジェ曲線と、ベジェ曲線を測地線とする可展面が生成される。図 3.5 のように、可展面の形状は、ベジェ曲線の始点からの弧長  $s$  における測地線上の座標  $p(s)$  と、式 3.1 により計算される、 $s$  における ruling 方向  $d(s)$  に



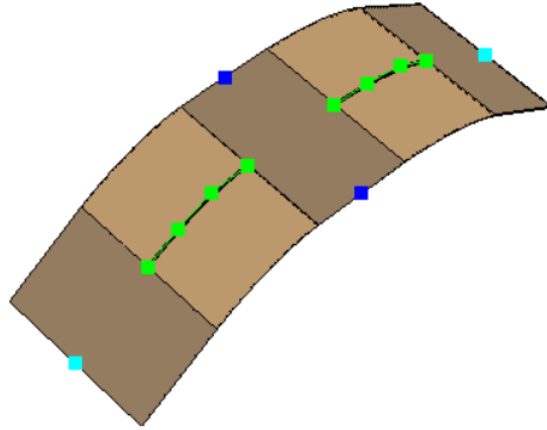


図 3.4: 設計された曲面部品例。濃い茶色の平面は平面部分、薄い茶色の可展面はスリット部分を表す。緑色の点は可展面の測地線である 3 次ベジェ曲線の制御点を表す。水色の点が付与された辺には平面部品が接続し、青色の点が付与された点には固定部品が接続する。

よって表される [26]。可展面の幅  $A$  は 3.1 節で前述したスリットパターン全体の幅  $A$  と同様に求める。

$$\mathbf{d}(s) = \frac{\mathbf{p}''(s) \times \mathbf{p}'''(s)}{\|\mathbf{p}''(s) \times \mathbf{p}'''(s)\|} \quad (3.1)$$

可展面が生成され、スリット部分の形状が入力されると、可展面の両端に平面部分を表す平面が生成される。提案手法では、図 3.6 のように、平面部分を表す平面は測地線の端点からの距離  $l_{plength}^i$  と、測地線の端点における接線ベクトルとのなす角  $\theta_{plane}^i$  で表される。ここで、 $i$  はベジェ曲線の始点側の端点を 0 とし、終点側の端点を 1 とする。スリット部分の形状の入力直後は、形状の最適化を行っていないため、仮の値として  $\theta_{plane}^0 = \theta_{plane}^1 = 0^\circ$  とする。その後、3.5 節で説明するスリット部分の形状の最適化を行うことで、 $\theta_{plane}$  の値が更新される。本研究では、平面部分の辺のうち、スリット部分と連結する側の対辺は、スリットパターンの切断線に平行であるものとする。

複数の平面部分とスリット部分を交互に連結した構造を設計する場合は、ベジェ曲線を追加で入力することで行う。新たに設計されるスリット部分は、最後に設計したスリット部分と平面部分を介して接続するように生成される。

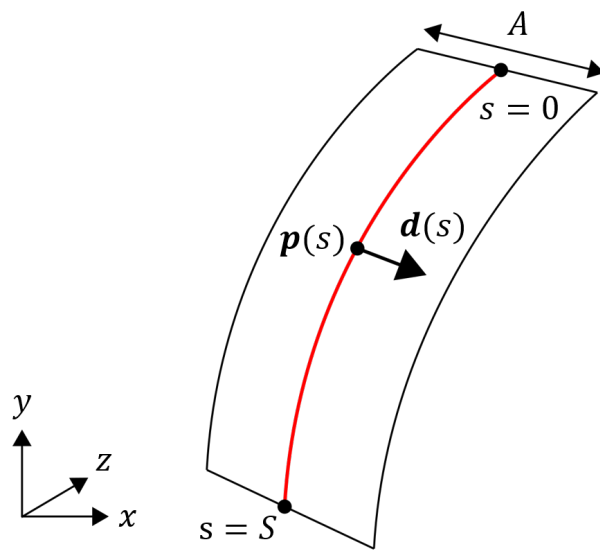


図 3.5: 可展面のパラメータ。赤い曲線は測地線を表す。測地線全体の弧長を  $S$  とする。

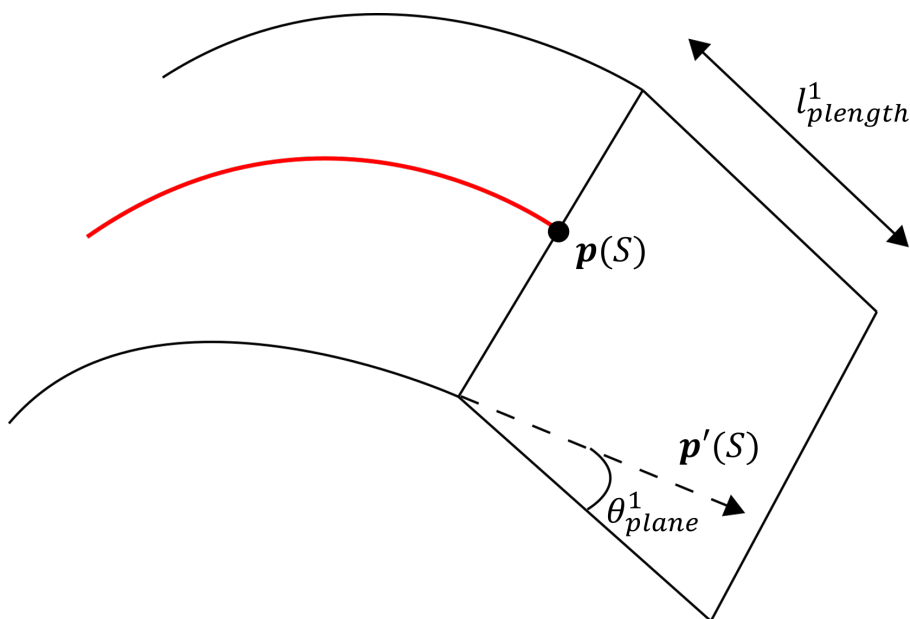


図 3.6: 平面部分のパラメータ。図はベジェ曲線の終点側に接続した平面部分を示す。

### 3.3 部品間の接続関係の入力

第1章で述べたように、提案手法で扱う立体構造は各部品を接合部で接続することで制作される。提案手法では、平面部品と曲面部品間の接続と、平面部品同士の接続の2種類の接続がある。本節では、それぞれの接続について、接続する部品の指定方法について述べる。

#### 3.3.1 平面部品と曲面部品の接続

ユーザは、接続する平面部品  $P$  と曲面部品  $C$  のペアと、各部品のどの辺で接続を行うかをスクリーン上で指定する。その後、指定された接続関係に合わせて、各部品の形状が自動的に修正される。このとき、接続したい曲面部品  $C$  が既に他の平面部品と接続しているかによって、形状修正で行う操作が変化する。以下にそれぞれの場合における操作内容を示す。

##### 他の平面部品と接続していない場合

3.1節で述べた通り、曲面部品のスリット部分が曲がることで作られる曲面は、ねじれが無い柱面に限定される。可展面が柱面の場合、可展面の *ruling* は測地線の全ての区間において平行である。このとき、測地線であるベジェ曲線は平面上に乗る。このことから、曲面部品のスリット部分を構成する、全てのベジェ曲線の制御点が同一平面上に乗る必要がある。平面部品と曲面部品が接続した際は、図3.7のように、平面部品  $P$  と曲面部品  $C$  が接続する辺の向きを法線とする平面  $P_{align}$  上に全ての制御点を乗せる。ここでは、各制御点から  $P_{align}$  に向けて垂線を下ろし、垂線の足へ制御点を移動する。これにより、曲面部品  $C$  のスリット部分を表す可展面の *ruling* が、曲面部品と平面部品が接続している辺の向きと平行になる。

制御点を  $P_{align}$  へ移動した後は、平面部品  $P$  と、曲面部品  $C$  の平面部分が辺を共有するように、曲面部品  $C$  を移動する。

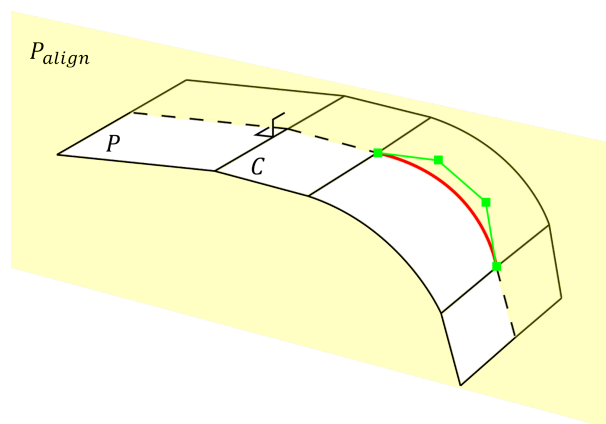


図 3.7:  $P_{align}$  へ移動後の制御点の例。3次ベジェ曲線の制御点を緑点で表す。

### 他の平面部品と既に接続している場合

接続しようとする曲面部品  $C$  が他の平面部品と既に接続しているとき、曲面部品  $C$  は2つの平面部品と接続することになる。ここでは、既に接続している平面部品を  $P_0$ 、新しく接続する平面部品を  $P_1$  とおく。3.2.2 節より、平面部分の辺のうち、スリット部分と連結する側の対辺は、スリットパターンの切断線に平行となる。このとき、曲面部品  $C$  のスリット部分を表す可展面の **ruling** は、2つの平面部品の接続する辺の向きと平行でなければならない。曲面部品  $C$  の **ruling** は、既に接続している平面部品  $P_0$  の接続している辺の向きで決定している。そのため、新たに接続する平面部品  $P_1$  の辺の向きを、曲面部品  $C$  の **ruling** に一致するように修正する。

新たに接続する平面部品  $P_1$  の辺の向きを修正する手順を図 3.8 に示す。まず、曲面部品  $C$  の新たに接続する端の平面部分を延長し、新たに接続する平面部品  $P_1$  との交線  $l_{cross}$  を求める。この交線  $l_{cross}$  の向きが  $P_1$  の修正後の辺の向きとなる。次に、修正する辺の両端の頂点を  $l_{cross}$  へ移動する。このとき、修正する辺に隣接する辺の向きが変化しないようにするため、 $l_{cross}$  と、修正する辺に隣接する辺との交点に頂点を移動する。また、曲面部品  $C$  の平面部分の長さ  $l_{plength}^i$  を、延長後の長さに合わせて更新する。

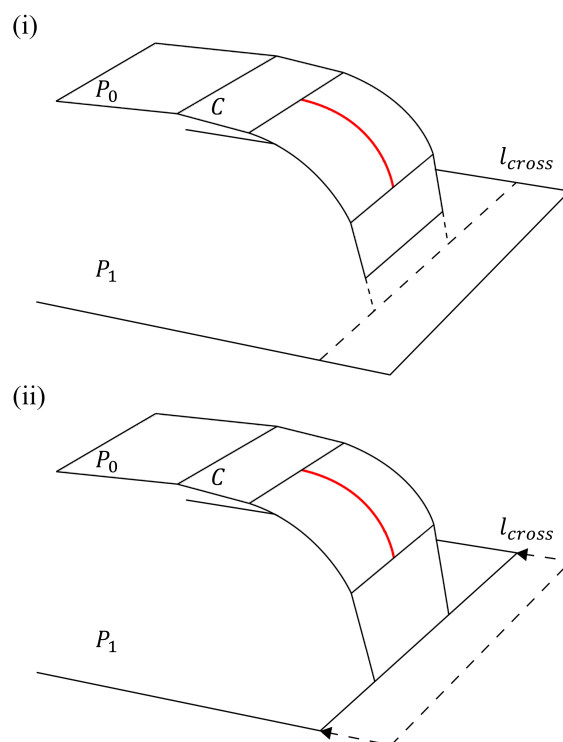


図 3.8: 平面部品と曲面部品の形状修正の例。(i)  $C$  の平面部分を延長し、 $P_1$  との交線  $l_{cross}$  を求める。(ii)  $P_1$  の頂点を修正する辺に隣接する辺と、 $l_{cross}$  との交点へ頂点を移動する。また、 $C$  の平面部分の長さ  $l_{plength}^i$  を更新する。

### 3.3.2 平面部品同士の接続

平面部品同士の接続は、それぞれの部品の辺に付与された接合部同士を繋げることで行う。そのため、接合部を付与する辺を指定する。この操作の流れを図3.9に示す。ユーザは、スクリーン上で接続したい2つの平面部品の辺をマウスでそれぞれ選択する。その後、2つの平面部品が選択した辺で接触するように、それぞれの部品の形状を自動で修正する。まず、接続する2つの平面部品のそれぞれの基準平面同士の交線  $l_{joint}$  を求める。この交線  $l_{joint}$  上で2つの部品が接触する。次に、接続する各平面部品の辺の両端の頂点を  $l_{joint}$  上に移動する。3.3.1節と同様に、修正する辺に隣接する辺の向きが変化しないようにするため、 $l_{joint}$  と、修正する辺に隣接する辺との交点に頂点を移動する。

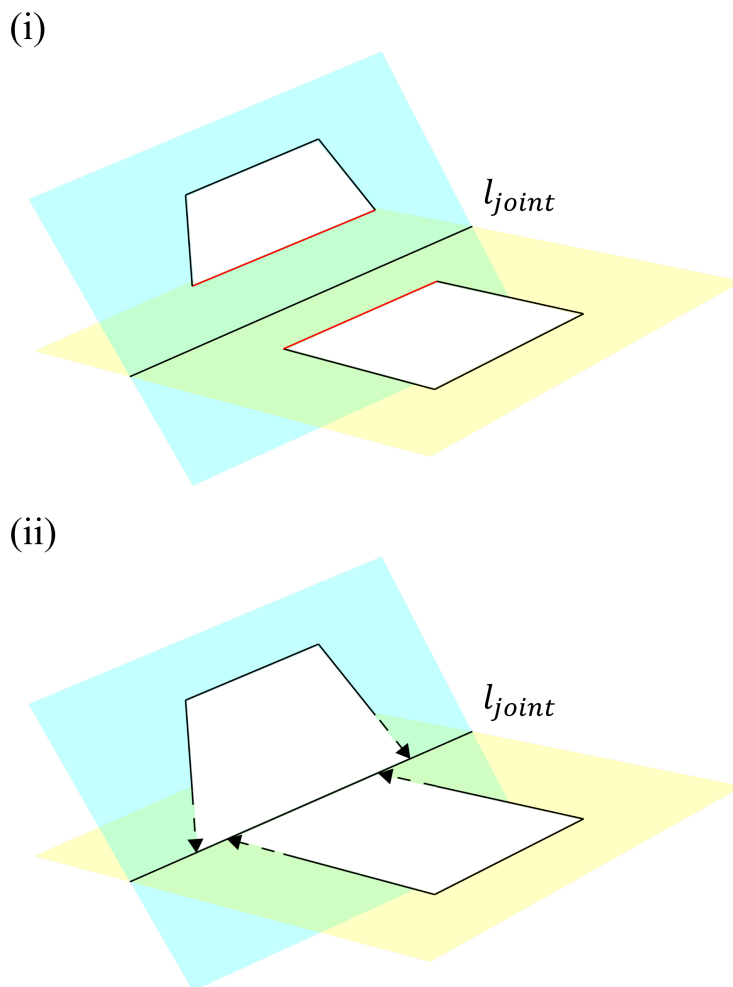


図 3.9: 平面部品同士の接続の例。青色と黄色の平面は、平面部品の基準平面を表す。また、2つの平面部品はそれぞれ赤線の辺で接続するものとする。(i) 2つの平面部品の基準平面の交線  $l_{joint}$  を求める。(ii) 頂点を修正する辺に隣接する辺と、 $l_{joint}$  との交点へ頂点を移動する。

### 3.4 サンプルの曲げ形状計測

提案手法では、スリット部分を曲げた際の断面の形状を曲げ形状と呼び、曲げ形状を計測することで曲面部品のスリット部分の設計に利用する。曲げ形状の計測には、図 3.10 に示すようなサンプルを用いる。サンプルは曲面部品から接合部を除いた構造をしており、1つのスリット部分と2つの平面部分を持つ。本研究では、3.1節で述べたパラメータを以下のように設定したサンプルで曲げ形状の計測を行った。

- スリットの長さ方向の間隔： $a = 1mm$
- 素材の厚さ： $b = 2.5mm$
- 切断線の幅： $g = 0mm$
- 切断部分の幅： $l = 5mm$
- 切断線の長さ方向の本数： $2 \leq m \leq 18$  の範囲で2ずつ変化
- 切断部分の幅方向の本数： $n = 4$
- スリットの幅方向の間隔： $s = 5mm$

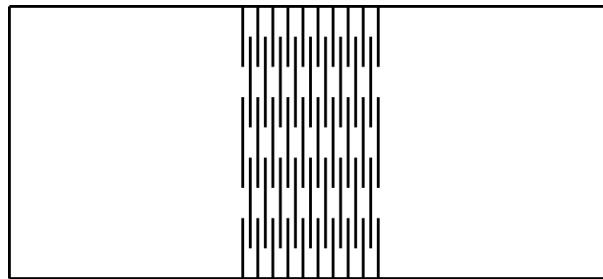


図 3.10: サンプルの展開図の例

本研究では、サンプルの制作と立体構造の制作において、スリットパターンのパラメータと使用する素材を等しくする必要がある。異なるスリットパターンのパラメータや素材を立体構造の制作に使用した場合については、5.2節で考察する。

サンプルの曲げ形状の計測は以下に示す手順で行う。まず、サンプルを曲げ、曲げ形状を計測する。サンプルを曲げる際は、一方の平面部分を固定し、もう一方の平面部分に対して面に垂直な向きに力を加える。その後、2つの平面部分のなす角が決められた角度になる位置で曲げ形状の計測をする。本論文では、 $10^\circ$  から  $170^\circ$  まで  $10^\circ$  ずつ角度を変化させながら、それぞれの角度での曲げ形状の計測を行った。曲げ形状の計測は、まずサンプルを曲げた状態をカメラで撮影する。その後、図 3.11 のように、スリットパターンの長さ方向の繰り返しごとの座標を調べる。スリットパターンの長さ方向の間隔  $a$  は明らかであるため、画像中の

座標からサンプルの曲げ形状を折れ線データとして計測することができる。曲げ角度が大きいとき、曲げたサンプルが破損することがあるが、この場合はサンプルが破損したことを記録する。

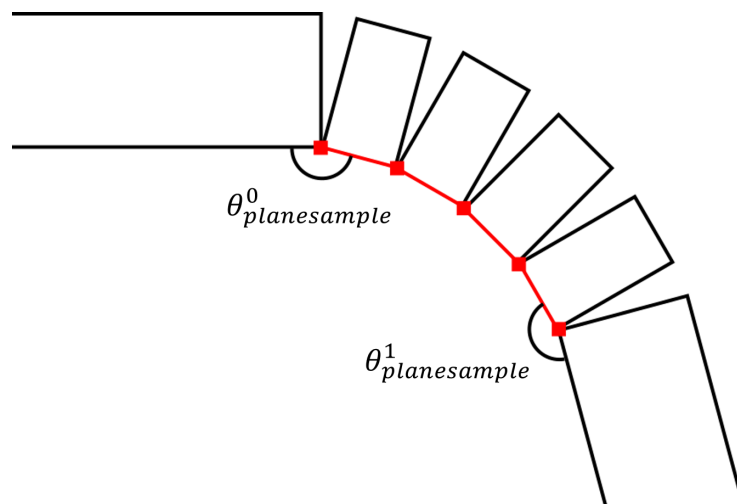


図 3.11: サンプルの曲げ形状の計測。赤色の折れ線で表される曲げ形状と、角度  $\theta_{planesample}^0$ 、 $\theta_{planesample}^1$  を計測する。

これにより、サンプルの曲げ形状を折れ線データとして計測できた。しかし、提案手法における、スリット部分の設計は3次ベジェ曲線を入力することで行う。そのため、サンプルの曲げ形状を設計に利用するためには、折れ線データを3次ベジェ曲線に変換する必要がある。ここでは、最小二乗法を用いて、折れ線データに3次ベジェ曲線をあてはめることで変換を行う。

また、3.2.2 節で前述したように、曲面部品の設計では平面部分とスリット部分のなす角  $\theta_{plane}^i$  が必要である。ここでは、スリット部分の曲げ形状の計測で用いた折れ線データの両端の線と、平面部分とのなす角  $\theta_{planesample}^i$  をサンプルのデータとして保存する。

これにより、切断線の長さ方向の本数  $m$  と、曲げ角度に対応する、サンプルの曲げ形状のデータを得る。

### 3.5 スリット部分の形状最適化

本節では、3.4 節で計測したサンプルの曲げ形状のデータを利用して、曲面部品のスリット部分の形状を最適化する手法について述べる。

スリット部分の形状の設計において測地線として入力する 3 次ベジェ曲線は、制御点が同一平面にあるという制約しか持たない。そのため、設計した曲面が実際に制作可能かどうかを考慮できない。そこで、測地線の形状を事前に計測したサンプルの曲げ形状に近づける操作を行う。

測地線となる 3 次ベジェ曲線は、3 次元空間中の様々な位置に配置されている。そのため、サンプルの曲げ形状のデータと、ベジェ曲線の形状を比較するためには、互いの座標系を揃える必要がある。ここでは、形状を比較したい曲線を、図 3.12 に示すような直交座標系に変換することで座標を揃える。提案手法では、この座標系を曲線の基準座標系と呼ぶ。座標系の原点は、曲線の始点となる。第 1 軸は、曲線の始点から終点へ向かう向きに取る。第 2 軸は、曲線の始点から曲線の比率  $t = 0.5$  となる点へ向かうベクトルと、 $t = 0.5$  となる点から曲線の終点へ向かうベクトルの外積の向きに取る。第 3 軸は、第 2 軸と第 1 軸の外積の向きに取る。基準座標系への座標変換は、座標のアフィン変換でも表せる。ベジェ曲線は、曲線のアフィン変換を行った結果と、アフィン変換を行った制御点から得られる曲線が一致するため、基準座標系へベジェ曲線の制御点を変換しても曲線の形状は不変である。よって、以下に示す式で制御点の座標を変換することで、曲線を基準座標系へ変換する。

$$\mathbf{c}_{trans}^i = \begin{pmatrix} n_{1x} & n_{2x} & n_{3x} \\ n_{1y} & n_{2y} & n_{3y} \\ n_{1z} & n_{2z} & n_{3z} \end{pmatrix}^{-1} (\mathbf{c}_{origin}^i - \mathbf{c}_{origin}^0) \quad (3.2)$$

ここで、 $\mathbf{c}_{origin}^i$  は座標変換前のベジェ曲線の  $i$  番目の制御点、 $\mathbf{c}_{trans}^i$  は座標変換後のベジェ曲線の  $i$  番目の制御点を表す ( $i = 0, 1, 2, 3$ )。また、基準座標系を、第 1 軸を  $(n_{1x}, n_{1y}, n_{1z})$ 、第 2 軸を  $(n_{2x}, n_{2y}, n_{2z})$ 、第 3 軸を  $(n_{3x}, n_{3y}, n_{3z})$  で表す。

曲線の座標系を統一した後、入力されたベジェ曲線の形状と、サンプルから計測した曲げ形状を比較する。形状の比較は以下の式を形状の誤差  $E_{shape}$  として考える。

$$E_{shape} = \sum_{i=0}^N \left\| \mathbf{p}_{sample} \left( \frac{i}{N} \right) - \mathbf{p}_{input} \left( \frac{i}{N} \right) \right\|_2 \quad (3.3)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{sample}$  はサンプルの曲げ形状を表すベジェ曲線上の点、 $\mathbf{p}_{input}$  は入力されたベジェ曲線上の点を表し、 $\mathbf{p}(t)$  は比率  $t \in [0, 1]$  における曲線上の点を表す。また、 $N$  は曲線の区間の分割数を表す。提案手法では、 $N = 100$  とした。式 3.3 を用いて、入力されたベジェ曲線と、全てのサンプルから計測された曲げ形状を比較し、 $E_{shape}$  が最小のサンプルの切断線の長さ方向の本数  $m$  と曲げ角度を求める。

この操作では、サンプルから計測した曲げ形状のデータの中で、どのデータが入力されたベジェ曲線に最も近いかを調べる。そのため、入力されたベジェ曲線の制御点の座標を、最も近いサンプルデータの制御点の配置と等しいものに修正することで、設計中の曲面部品の



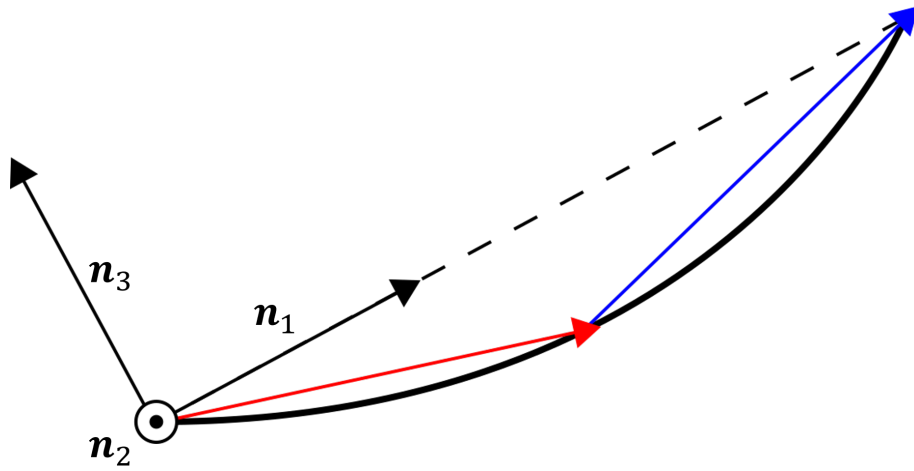


図 3.12: 曲線の基準座標系。第 1 軸を  $n_1$ 、第 2 軸を  $n_2$ 、第 3 軸を  $n_3$  で表す。第 2 軸は曲線の始点から曲線の比率  $t = 0.5$  となる点へ向かうベクトル (赤) と、 $t = 0.5$  となる点から曲線の終点へ向かうベクトル (青) の外積の向きに取る。

スリット部分の形状を、実際に制作可能な形状へ近づけることができる。しかし、この修正では、事前に計測したサンプルの曲げ形状と同じ形状しか制作することができない。そこで、サンプルから計測した曲げ形状のデータを補間することで、制作可能なスリット部分の形状を増やす。

サンプルの曲げ形状のデータの補間は、2つのデータを線形補間することで行う。補間に用いる 1つ目のデータ  $D_1$  は、入力されたベジエ曲線に最も形状に近い曲げ形状を、前述した手法で求めることで決定する。2つ目のデータ  $D_2$  は、 $D_1$  とスリットパターンの切断線の長さ方向の本数  $m$  が等しく、曲げ角度が  $\pm 10^\circ$  異なるデータを用いる。提案手法では、曲げ角度が  $+10^\circ$  異なるデータと  $-10^\circ$  異なるデータを用意し、式 3.3 を用いて入力されたベジエ曲線との形状の誤差  $E_{shape}$  をそれぞれ求める。そして、 $E_{shape}$  がより小さいデータを、 $D_2$  として決定する。

曲げ形状のデータの線形補間は、以下の式を用いて、ベジエ曲線の制御点の座標を求めることで行う。

$$\mathbf{c}_{interpolate}^i = (1 - \alpha)\mathbf{c}_{sample1}^i + \alpha\mathbf{c}_{sample2}^i \quad (3.4)$$

ここで、 $\mathbf{c}_{interpolate}^i$  は線形補間後のベジエ曲線の  $i$  番目の制御点、 $\mathbf{c}_{sample1}^i$  は  $D_1$  の  $i$  番目の制御点、 $\mathbf{c}_{sample2}^i$  は  $D_2$  の  $i$  番目の制御点を表す ( $i = 0, 1, 2, 3$ )。提案手法では、 $\alpha \in [0, 1]$  の範囲で  $\alpha$  を変化させながら、式 3.4 で求めた制御点から生成されるベジエ曲線の形状を、式 3.3 と同様の手法で、入力されたベジエ曲線の形状と比較する。そして、 $E_{shape}$  が最小となるような  $\alpha$  から求まる  $\mathbf{c}_{interpolate}$  を制御点とするベジエ曲線の形状を、最適化された、スリット部分を表す可展面の測地線の形状とする。

線形補間によって求めた、最適化された測地線の形状を入力された測地線に反映させるた

めには、以下の式を用いる。

$$\mathbf{c}_{newinput}^i = \begin{pmatrix} n_{input1x} & n_{input2x} & n_{input3x} \\ n_{input1y} & n_{input2y} & n_{input3y} \\ n_{input1z} & n_{input2z} & n_{input3z} \end{pmatrix} \mathbf{c}_{opt}^i + \mathbf{c}_{input}^0 \quad (3.5)$$

ここで、 $\mathbf{c}_{input}^i$  は最適化前の入力されたベジエ曲線の  $i$  番目の制御点の座標を表す。 $\mathbf{c}_{newinput}^i$  は最適化後の入力されたベジエ曲線の  $i$  番目の制御点の座標、 $\mathbf{c}_{opt}^i$  は、 $E_{shape}$  が最小となるような  $\alpha$  で線形補間を行った際の  $\mathbf{c}_{interpolate}^i$  を表す。また、最適化前の入力されたベジエ曲線の基準座標系を、第 1 軸を  $(n_{input1x}, n_{input1y}, n_{input1z})$ 、第 2 軸を  $(n_{input2x}, n_{input2y}, n_{input2z})$ 、第 3 軸を  $(n_{input3x}, n_{input3y}, n_{input3z})$  で表す。

ここまでの手順により、ユーザが設計した曲面部品のスリット部分の曲げ形状を、実際に制作可能な形状に最適化することができた。次に、平面部分とスリット部分のなす角  $\theta_{plain}^i$  を最適化する。最適化は、スリット部分の曲げ形状の最適化の際に、線形補間に用いた 2 つのサンプル  $D_1$ 、 $D_2$  の  $\theta_{planesample}^i$  を利用し、以下の式で行う。

$$\theta_{plain}^i = (1 - \alpha)\theta_{planesample1}^i + \alpha\theta_{planesample2}^i \quad (3.6)$$

ここで、 $\theta_{planesample1}^i$  は  $D_1$  の  $\theta_{planesample}^i$ 、 $\theta_{planesample2}^i$  は  $D_2$  の  $\theta_{planesample}^i$  を表す。また、 $\alpha$  は  $\mathbf{c}_{opt}^i$  を求めた際の  $\alpha$  と同じ値を用いる。

$\theta_{plane}^i$  の値の計算後、スリット部分を **ruling** 方向を回転軸としてスリット部分を回転させることで、平面部分とスリット部分のなす角が  $\theta_{plane}^i$  となるようにする。まず、回転前の  $\theta_{plain}^0$  と最適化後の  $\theta_{plain}^0$  の差を計算し、回転角  $\phi$  を求める。このとき、スリット部分の **ruling** 方向の単位ベクトルを  $(n_x, n_y, n_z)$  とおくと、スリット部分の測地線の制御点を  $\phi$  だけ回転させる回転行列  $\mathbf{R}$  は、ロドリゲスの回転公式より以下の式になる。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \phi + n_x^2(1 - \cos \phi) & n_x n_y(1 - \cos \phi) - n_z \sin \phi & n_x n_z(1 - \cos \phi) + n_y \sin \phi \\ n_y n_x(1 - \cos \phi) + n_z \sin \phi & \cos \phi + n_y^2(1 - \cos \phi) & n_y n_z(1 - \cos \phi) - n_x \sin \phi \\ n_z n_x(1 - \cos \phi) - n_y \sin \phi & n_z n_y(1 - \cos \phi) + n_x \sin \phi & \cos \phi + n_z^2(1 - \cos \phi) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

このことから、スリット部分を測地線の始点を中心に  $\phi$  だけ回転させた際のベジエ曲線の制御点は以下の式で求まる。

$$\mathbf{c}_{rotated}^i = \mathbf{R}(\mathbf{c}_{newinput}^i - \mathbf{c}_{newinput}^0) + \mathbf{c}_{newinput}^0 \quad (3.8)$$

ここで、 $\mathbf{c}_{rotated}^i$  は、回転後のベジエ曲線の  $i$  番目の制御点である ( $i = 0, 1, 2, 3$ )。

スリット部分を回転させた後は、 $\theta_{plane}^1$  を最適化後の値へ修正する。この操作を、全てのスリット部分に対して行うことで、曲面部品の形状を最適化する。

### 3.6 固定部品的设计

平面部品と曲面部品の形状の設計と部品間の接続関係の入力が完了した後、曲面部品の形状を固定するための固定部品の設計を行う。

ユーザは、固定部品で接続する、曲面部品  $C$  の平面部分と平面部品  $P$  のペアを選択する。まず、固定部品  $F$  を接続したい曲面部品  $C$  の平面部分の辺をマウスで選択する。選択後、図 3.13 のように、スクリーン上には固定部品  $F$  の向きを表す ray が表示される。ray は選択した平面部分の辺から発射され、ユーザは ray の方向を変えることで固定部品  $F$  の向きと、固定部品  $F$  を接続する平面部品  $P$  を指定する。

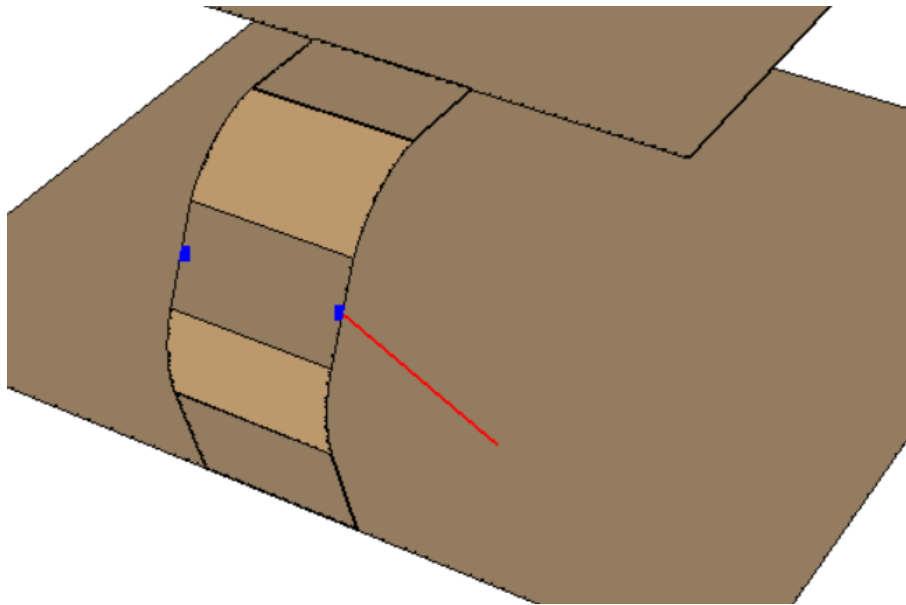


図 3.13: 固定部品で接続する、曲面部品と平面部品のペアの選択。赤線で示す ray の始点が存在する曲面部品の平面部分と、ray が交差する平面部品を接続するように選択されている。

その後、固定部品  $F$  の厚みを考える。固定部品  $F$  に付与される厚みの方向は、曲面部品  $C$  の平面部分と、固定部品  $F$  の角度  $\theta_{angle}$  より決まる。 $\theta_{angle}$  を求める際は、図 3.14 のように平面部分の幅方向と法線方向からなる座標平面上で、曲面部品  $C$  の平面部分の法線と、ユーザが指定した固定部品  $F$  の向きがなす角を計算する。固定部品  $F$  に付与される厚みの方向は、図 3.15 のように、 $\theta_{angle} < 90^\circ$  と  $\theta_{angle} \geq 90^\circ$  で変化する。その後、固定部品の幅と厚さから、固定部品の曲面部品と接続する側の 4 頂点の座標が決定する。提案手法では、固定部品  $F$  の幅は接続する平面部分の長さ  $l_{plength}$  であり、固定部品の厚さは素材の厚さとする。

次に、前述した方法で求めた、固定部品  $F$  の曲面部品と接続する側の 4 頂点から、ユーザが指定した固定部品  $F$  の向きに ray を発射する。このとき、図 3.16 のように、4 本の ray それぞれに対して、固定部品  $F$  と接続する平面部品  $P$  との交点と、交点までの距離が求まる。ここでは、最も距離が短い ray の交点を  $p_{root}$ 、 $p_{root}$  から見て、固定部品  $F$  の幅方向で対と

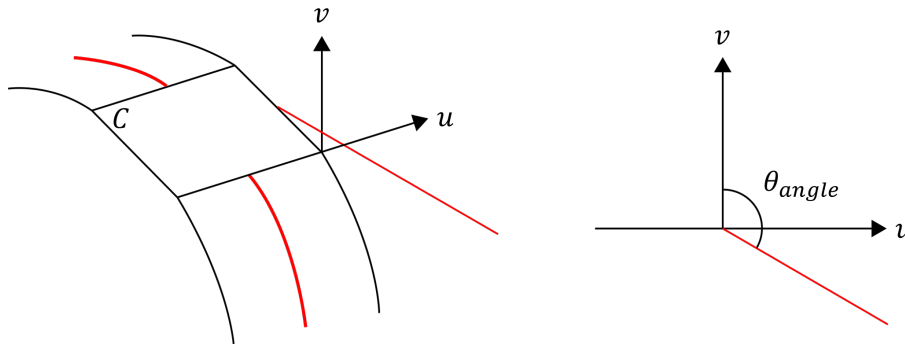


図 3.14:  $\theta_{angle}$  の計算例。左図は  $\theta_{angle}$  を計算するための座標平面の定義を示す。赤直線はユーザが指定した固定部品  $F$  の向きを示す。曲面部品  $C$  の幅方向を  $u$ 、法線方向を  $v$  とおく。右図は  $uv$  平面上で  $\theta_{angle}$  を求めた結果を示す。

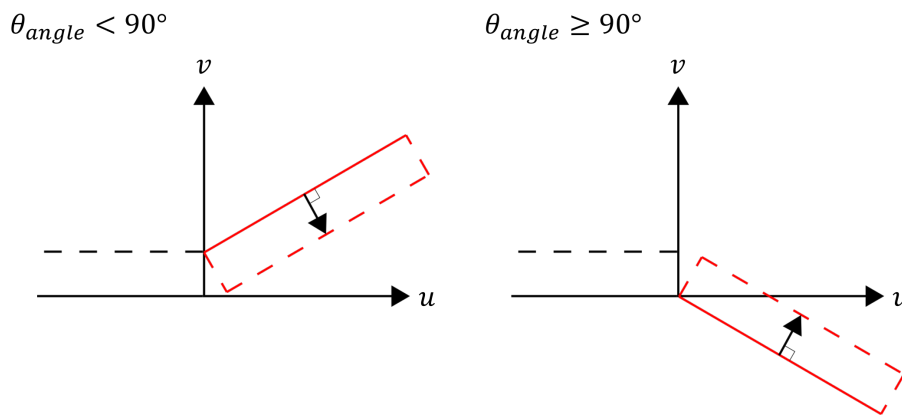


図 3.15: 固定部品に付与される厚みの方向。 $uv$  平面の定義は図 3.14 と同様である。 $\theta_{angle} < 90^\circ$  の場合は、曲面部品と固定部品に接合部を付与する際に、部品同士が交差するように、部品の厚みだけ固定部品を  $v$  軸方向へ移動する。

なる ray の交点を  $p_{width}$ 、固定部品  $F$  の厚さ方向で対となる ray の交点を  $p_{thick}$  とおく。その後、固定部品  $F$  の形状と、平面部品  $P$  に開ける穴の形状を求める。

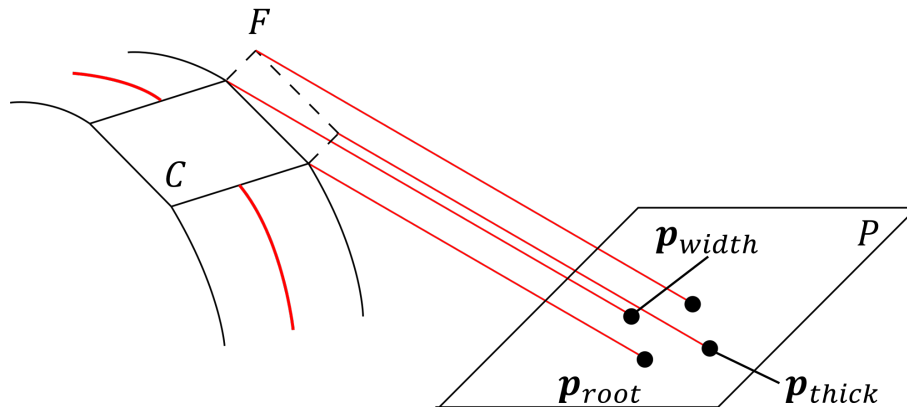


図 3.16: ray の交点の位置関係の例。赤直線はそれぞれの ray を表す。黒点はそれぞれの ray の平面部品との交点を表す。

固定部品の形状を図 3.17 に示す。このとき、固定部品と平面部品が干渉しないように固定部品の長さ  $l_0$ 、 $l_1$  を決める必要がある。ただし、 $l_0 \leq l_1$  である。そのため、 $p_{root}$  を交点に持つ ray の距離と  $p_{width}$  を交点に持つ ray の距離をそれぞれ  $l_0$ 、 $l_1$  に代入する。

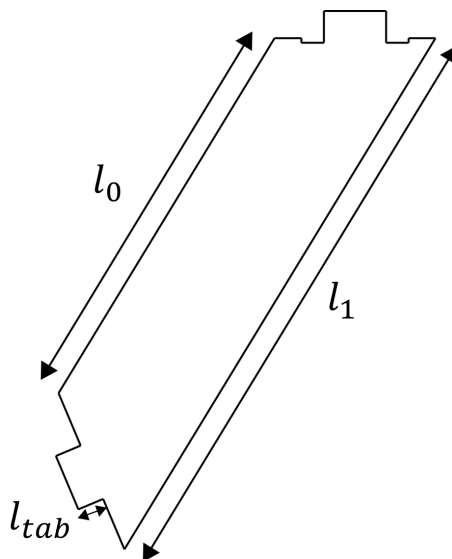


図 3.17: 固定部品の模式図。上部の辺に付与された接合部については、3.7 節で後述する。

平面部品に開ける穴の模式図を図 3.18 に示す。固定部品と平面部品は、 $p_{root}$  と  $p_{width}$  がなす辺  $e_{width}$  で接している。このとき、平面部品に開ける穴は  $e_{width}$  に対して垂直な方向に開けられる。しかし、 $e_{width}$  に対して垂直な方向 2 つ存在するため、どちらかに決定する必要がある。

ある。提案手法では、 $p_{thick}$  から  $e_{width}$  に垂線を下ろすことで、穴の向きを決定する。

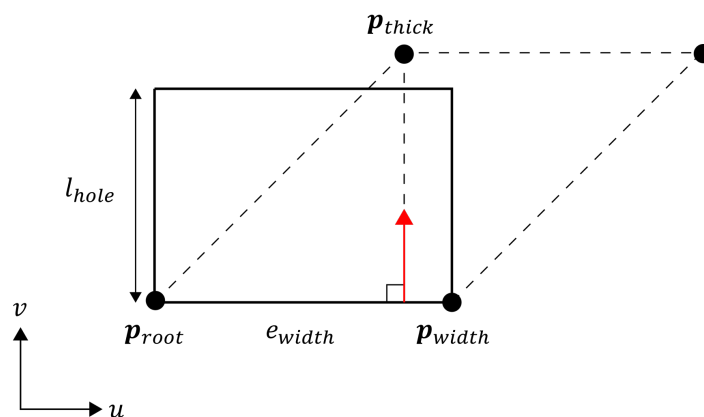


図 3.18: 平面部品に開ける穴の模式図。平面部品の基準平面を  $uv$  平面とする。黒点は 4 本の ray の平面部品との交点を示す。 $p_{thick}$  から  $e_{width}$  に垂線を下ろすことで、穴の向き (赤矢印) を決定する。

平面部品に開ける穴の向きを決定した後、固定部品の爪の長さ  $l_{tab}$  と穴の幅  $l_{hole}$  を計算する。固定部品と平面部品を接続した際の断面図を図 3.19 に示す。図 3.19 より、固定部品と平面部品のなす角を  $\phi$ 、素材の厚さを 3.1 節より  $b$  とおくと、 $l_{tab} = b / \sin \phi$ 、 $l_{hole} = b(1 + 1 / \tan \phi)$  となる。

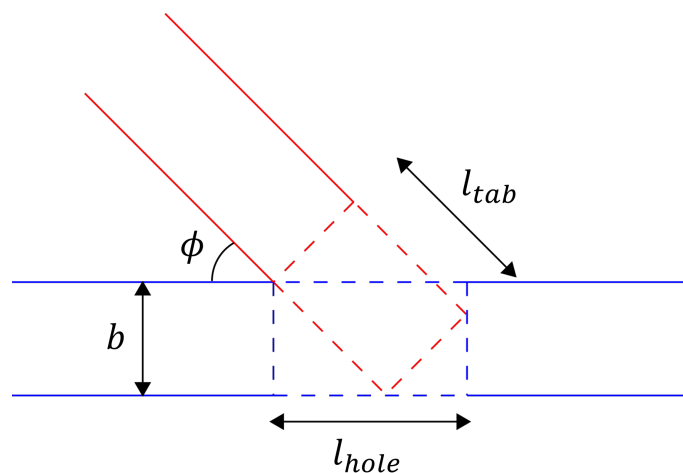


図 3.19: 固定部品と平面部品を接続した際の断面図。固定部品を赤、平面部品を青で示す。図中の破線部は、爪や穴として切断された領域を示す。

### 3.7 接合部の設計

平面部品と曲面部品の接続、平面部品同士の接続、曲面部品と固定部品の接続は、接合部を介して部品を繋げることで行う。提案手法では、接続する部品同士の角度に応じて接合部の形状を変えることで強度を確保している。本節では、接合部の設計手法について述べる。

接合部は、図 3.20 のように、オス側とメス側の 2 種類があり、オス側とメス側を組み合わせることで部品を固定する。接合部の各部分の寸法のうち、中央の爪の幅  $l_c$  と、その隣にある爪の幅  $l_s$  はユーザが用途に合わせて設定する。一方、爪の長さは接続する部品同士のなす角度から計算する。ここでは、接合部のある辺を基準として、部品の外側に伸びる部分の長さを  $l_{t+}$ 、内側に削れる部分の長さを  $l_{t-}$  とする。

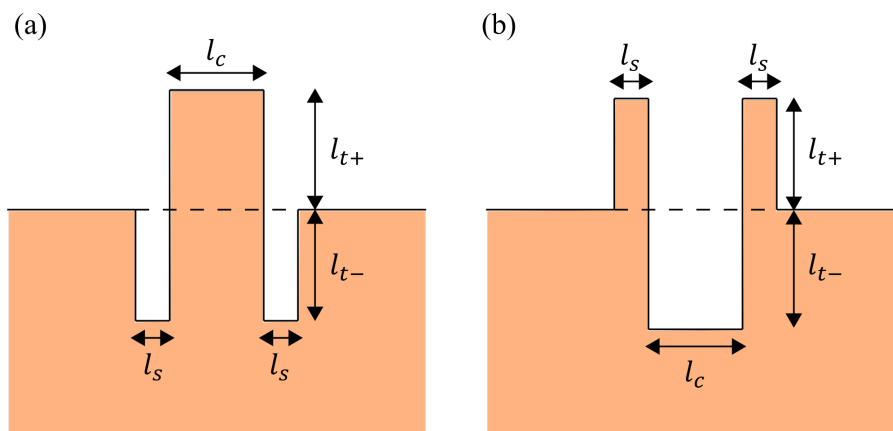


図 3.20: 接合部の模式図。(a) はオス側、(b) はメス側をそれぞれ示す。

接合部を介して 2 つの部品を接続する際の断面図を図 3.21 に示す。提案手法では、接合部は互いの部品を貫通する長さとなっている。2 つの部品のなす角を  $\phi$ 、素材の厚さを 3.1 節より  $b$  とすると、図 3.21 より、接合部の爪の長さはそれぞれ、 $l_{t+} = b / \sin \phi$ 、 $l_{t-} = -l_{t+} \cos \phi = -b / \tan \phi$  となる。提案手法では、 $\phi = 180^\circ$  に近い場合では  $l_{t+}$  と  $l_{t-}$  が大きな値となるため、それぞれの値に上限を設けることで形状の整合性を保っている。また、 $\phi = 90^\circ$  では  $l_{t+} = b$ 、 $\phi \leq 90^\circ$  では  $l_{t-} = 0$  となる。

接合部を辺に付与する際は、接続する部品の種類に応じて付与する位置  $p_{joint}$  を決定する。平面部品と曲面部品の接続する場合と、曲面部品と固定部品の接続する場合は、図 3.22 のように、曲面部品側の辺の midpoint を  $p_{joint}$  として付与する。

平面部品同士の接続では、図 3.23 に示す手順で接合部を辺に付与する位置を決定する。まず、接続している辺に含まれる、4 つの頂点の重心を求める。その後、4 つの頂点のうち、重心に近い 2 つの頂点を調べる。この 2 つの頂点の間が 2 つの平面部品が接触している区間となるため、この区間の midpoint を  $p_{joint}$  として接合部を付与する。

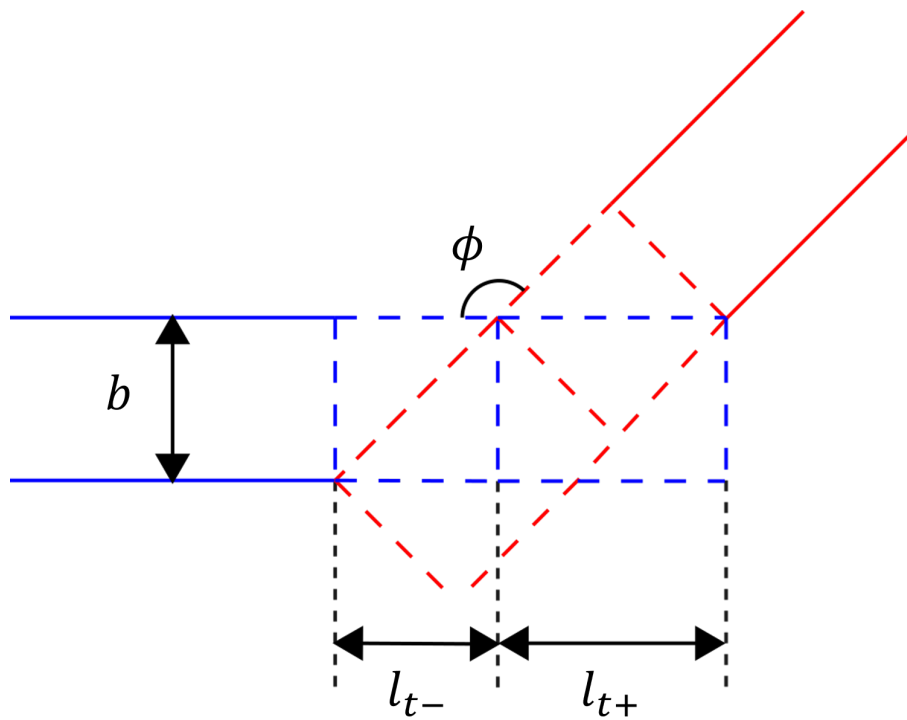


図 3.21: 接合部の断面図。青色の部品の  $l_{t+}$  と  $l_{t-}$  を求めている。全ての部品の厚さ  $b$  は等しいため、赤色の部品の  $l_{t+}$  と  $l_{t-}$  も同様に求められる。図中の破線部は、接合部として切断された領域を示す。

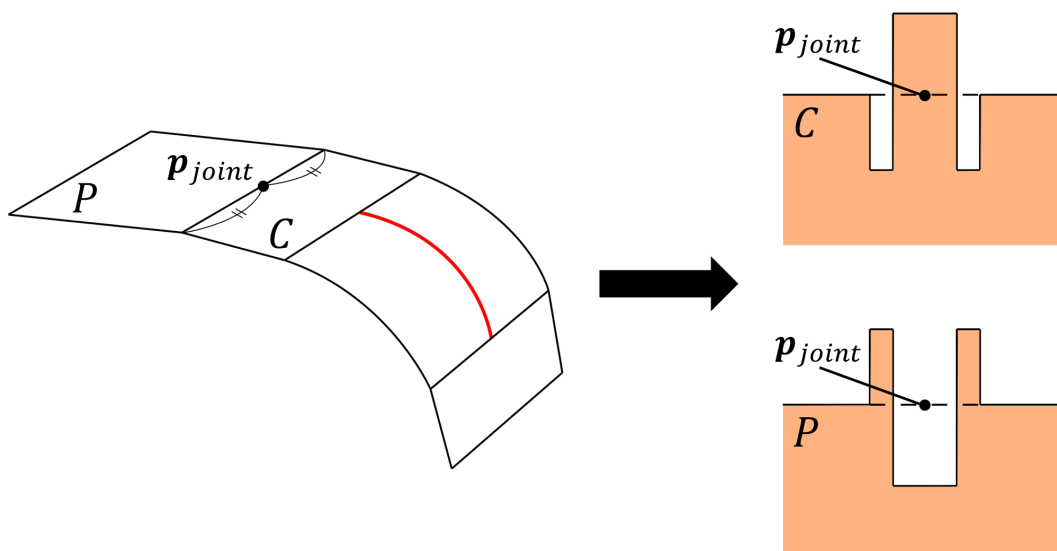


図 3.22: 部品の辺への接合部の付与の例。左図は平面部品  $P$  と曲面部品  $C$  を接続した場合を示す。右図は  $p_{joint}$  を基準として、各部品の辺に接合部を付与した結果を示す。



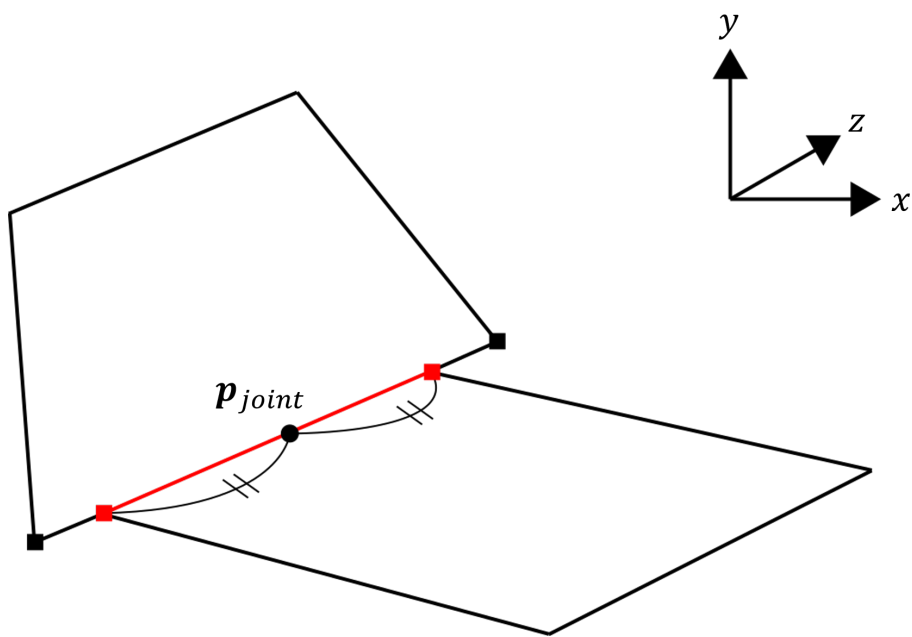


図 3.23: 平面部品同士の接続時における接合部の位置。4つの頂点のうち、重心に近い2つの頂点の間の区間(赤線)が、2つの平面部品が接触している区間となる。

## 第4章 結果

本章では、まず、提案手法を基にアプリケーションを実装し、立体構造を試作した結果について述べる。その後、3.4、3.5節の手法によって設計されたスリット部分について、設計時と試作時の形状の誤差を計測した結果について述べる。本論文では、MDF材を用いて各部品やサンプルの制作を行った。

### 4.1 提案手法による立体構造の試作

提案手法により生成された各部品の展開図データを用いて、レーザーカッターで素材の切断を行った。その後、切断した各部品を組み合わせることで、立体構造の試作を行った。本節における、各立体構造の全ての部品の展開図は、付録に記載する。

#### 4.1.1 固定部品のない立体構造

図4.1は、各曲面部品のスリット部分の数を1つにすることで、固定部品を必要としない立体構造を制作した例である。Ohshimaら[16]の手法では、スリット部分を固定することで曲面形状を制御している。一方提案手法では、曲面部品の平面部分のみを固定することで、スリット部分が作る曲面の形状を制御した。そのため、閉じていない立体や穴の開いた構造などのように、設計可能な立体形状の種類が増加している。

#### 4.1.2 固定部品のある立体構造

図4.2は、複数のスリット部分を含む曲面部品を用いた立体構造を制作した例である。1つの曲面部品に複数の立体構造を含む場合は、スリット部分間を連結する平面部分に、固定部品を接続することで曲面部品全体の形状を固定する。これにより、事前の計測に用いたサンプルより長い構造を持つ曲面部品を制作できる。

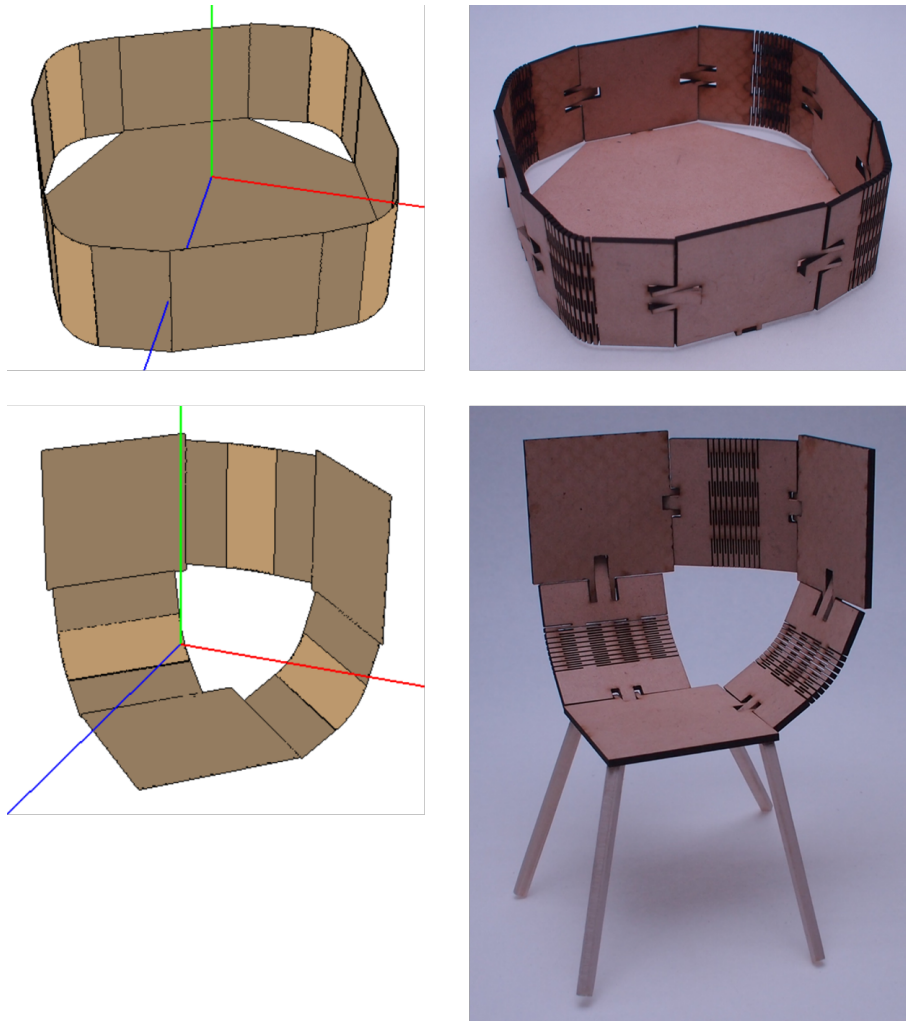


図 4.1: 固定部品のない立体構造の例。上段は皿であり、下段は椅子の座面部分である。左図はインタフェース中の立体構造であり、右図は実際に制作した結果である。椅子の座面部分の制作では脚を付加した。

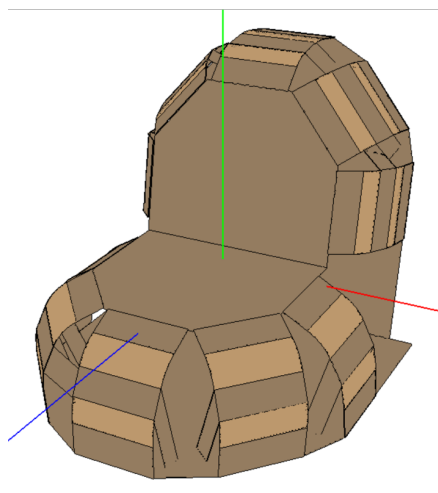
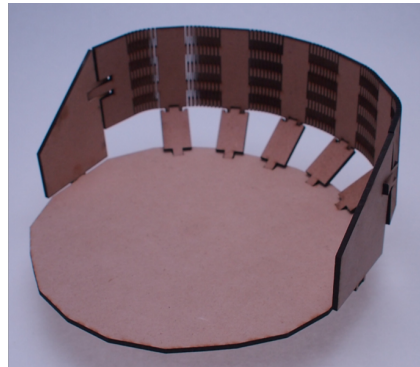
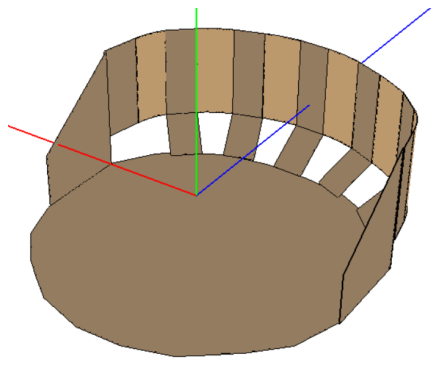


図 4.2: 固定部品のある立体構造の例。上段は椅子の座面部分である。下段では椅子全体を設計した (高さ 16cm)。

## 4.2 設計時と制作時のスリット部分の曲げ形状の誤差計測

提案手法によって設計した曲面部品の形状と、実際に素材を加工して制作した曲面部品を曲げることで得られる曲面の形状の比較を行った。制作時のスリット部分の形状の計測には、図 4.3 に示す装置を使用した。ここでは、設計時と同じ位置に平面部分を固定できる土台を制作し、サンプルと同様の構造に固定用の爪を付与した部品を取り付けた。スリット部分のパラメータは 3.4 節と同様のものを使用したが、切断線の長さ方向の本数  $m$  のみ 18 で固定した。スリット部分の曲げ形状を計測した後、3.4 節と同様の手順で 3 次ベジェ曲線をあてはめた。その後、式 3.3 と同様の手法で設計時のスリット部分の測地線の形状と、計測した曲げ形状の比較を行った。

測定結果を表 4.1 に示す。今回計測に用いたスリット部分の長さ  $L$  は 18mm であることから、最大誤差をスリット部分の長さの 1/10 程度に抑えることができた。4.1 節で制作した試作例は、1 辺が 20cm 程度の立方体に収まる大きさである。この程度の大きさの作品を作る場合においては、今回計測した誤差はほぼ無視できるものと考えられる。また、スリット部分の曲げ角度が大きくなるほど、設計時と制作時のスリット部分の形状誤差は大きくなることが分かった。

表 4.1: 設計時と制作時のスリット部分の曲げ形状誤差。  $D_1$ 、  $D_2$  は 3.5 節でスリット部分の形状の最適化時に求めたサンプルの曲げ角度である。  $\alpha$  は式 3.6 と同じ値である。  $E_{ave}$  は式 3.3 で求めた  $E_{shape}$  を曲線の区間の分割数 101 で割った値を示す。  $E_{max}$  は最も誤差が大きくなるような曲線の比率  $t$  における、曲線間の距離を示す。

$D_1$	$D_2$	$\alpha$	$E_{ave}(mm)$	$E_{max}(mm)$
20°	10°	0.3	< 0.01	0.17
30°	20°	0.46	< 0.01	0.07
30°	40°	0.49	< 0.01	0.1
50°	40°	0.36	< 0.01	0.29
60°	50°	0.43	< 0.01	0.28
60°	70°	0.25	< 0.01	0.29
80°	70°	0.46	< 0.01	0.45
90°	90°	0.36	< 0.01	0.54
100°	90°	0.47	< 0.01	0.97
100°	110°	0.39	0.01	1.04
110°	120°	0.31	0.01	1.12
130°	120°	0.31	0.01	1.47
130°	140°	0.24	0.01	1.5
150°	140°	0.24	0.02	1.82
150°	160°	0.19	0.02	1.91
170°	160°	0.26	0.01	1.29

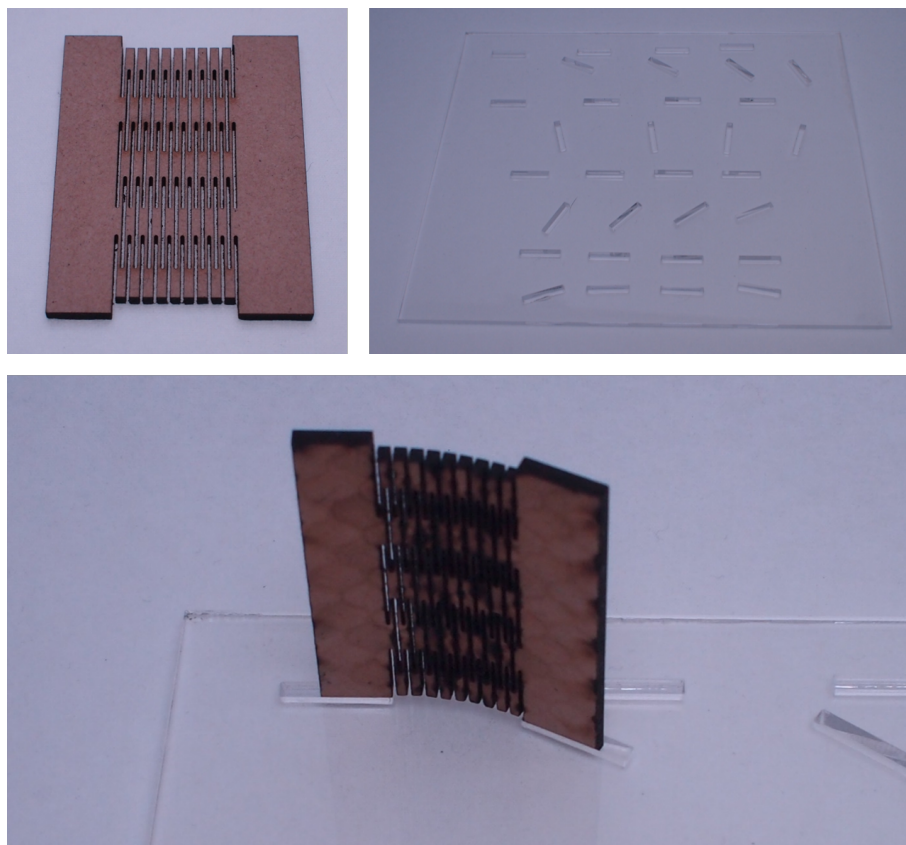


図 4.3: スリット部分の曲げ形状の計測装置。左図は計測に使用した部品である。右図は部品の桁以上を固定するための土台である。下図は土台に部品を取り付けた様子である。

## 第5章 結論と今後の課題

本章では、本研究の結論を述べた後、今後の課題について説明する。

### 5.1 結論

本研究では、スリットパターンのカットを施した素材を用いて、滑らかな曲面を含む立体構造の設計を支援する手法を提案し、実際に立体構造を制作した。提案手法では、平面部品と曲面部品の形状と、部品間の接続関係を入力することで、立体構造を設計した。曲面部品のスリット部分は、3次ベジェ曲線を測地線とする可展面を入力することで設計し、事前にサンプルの曲げ形状を測定した結果を利用することで、実際にカットを施した素材を曲げて得られる曲面に近い形状を設計可能とした。また、各部品の形状を固定するために、固定部品と接合部の設計手法について提案した。試作した立体構造は、各部品の接合部同士を組み合わせることで組み立てられ、滑らかな曲面を持つ立体構造を制作できることを確認した。また、アプリケーション内で設計した曲面と実際に制作した曲面の形状を比較し、提案手法の有用性について議論した。

### 5.2 今後の課題

今後の課題として、以下の点が考えられる。

- 設計可能な曲面部品の形状が、凸な形状に限定されている。提案手法では、3.4節で述べたように、スリット部分を曲げた際の断面の内側を曲げ形状として扱っている。そのため、図5.1で示すように、複数のスリット部分を含む曲面部品を考えた際に、曲面部品全体が凸な形状であれば、部品の厚みを考えた際に整合性を保つことができる。しかし、曲面部品全体が凸な形状でない場合、部品の厚みを考えた際に平面部分で整合性が取れなくなる。提案手法では、各部品は厚みのない面のデータとして扱う。そのため、ユーザが部品の厚みを面の表裏のどちらに付与するかを考慮した入力方法の改良が必要となる。
- 提案手法の接合部では、設計時の部品同士のなす角で実際に部品を接続できる保証はない。これは、部品をレーザーカッターで切断することを想定しているため、切断線が素材に対して垂直に限定され、複雑な形状を制作できないことが原因である。よって提案手法では、接合部は組み合わせた際の摩擦で部品を固定することを想定して設計

されている。そのため、部品を特定の形状で固定できるような接合部を制作できない。今後の課題としては、Schwartzburg らの手法 [23] のように、部品同士を組み合わせると、特定の角度で固定されるような接合部の形状を考案することが挙げられる。しかし、Schwartzburg らの手法は垂直以外の切断を許容しているため、垂直な素材の切断だけで等しい機能を持つ部品を制作する必要がある。

- 部品数の削減を可能にする。本研究で扱う立体構造では、曲面部品の両端の平面部分は、接合部で平面部品と接続することで固定される。しかし、図 5.2 のように、始めから曲面部品の一方の端を平面部分と接続した状態で部品を加工すれば、組み立て時間の短縮や、デザイン性の向上につながる。レーザーカッターで加工可能な素材の大きさは決まっていることから、この課題を解決する際は、部品を平面に展開した際に、部品が一定の大きさに収まるように設計に制約を加えるなどの工夫が必要となる。
- スリットパターンのパラメータや素材が、スリット部分の曲げ形状に与える影響について考察する。ここでは、4.2 節の実験で使用した部品から、スリットパターンのパラメータや素材を変えたものを用意し、曲げ形状に与える影響を調べた。まず、切断部分の幅方向の本数  $n$  を 4 から 8 に変更した部品を用意し、4.2 節の実験で使用した部品と曲げ形状を比較した。4.2 節における  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $\alpha$  はそれぞれ、 $D_1 = 170^\circ$ 、 $D_2 = 160^\circ$ 、 $\alpha = 0.26$  とした。その結果、 $E_{ave}$  は 0.01mm 未満、 $E_{max}$  は 0.31mm となった。次に、厚さ以外のスリットパターンのパラメータを変えずに、素材を厚さ 2mm のアクリルに変更し、同じ実験を行った。その結果、 $E_{ave}$  は 0.01mm 未満、 $E_{max}$  は 0.41mm となった。この結果、どちらの実験でも最大誤差はスリットの長さの 1/10 以下であった。最後に、スリットの長さ方向の間隔  $a$  を 1mm から 3mm に、切断線の長さ方向の本数  $m$  を 18 から 6 に変更し、スリット部分の長さを変えずに、スリットの間隔を変更した部品を用意した。その後、この部品を曲げたが、最大で約  $10^\circ$  しか曲げられなかった。これらの実験から、スリットパターンのパラメータごとにスリット部分の曲げに与える影響は異なることが分かった。そのため、現在の提案手法では、曲面部品の設計に用いるスリットパターンのパラメータや素材を変更するたびに、サンプルの曲げ形状計測を行うものとしている。今後は、スリットパターンの各パラメータが曲げ形状に与える影響を調べ、パラメータの変化に応じて曲げ形状に補正を加える手法の確立が求められる。
- 異なるカットパターンや、スリット部分の曲げ操作への対応について考察する。本研究では、硬い素材を曲げるためにスリットパターンを使用した。また、スリットの曲げ操作は、スリットの長さ方向への曲げに限定し、ねじりを加えないものとした。しかし、異なるカットパターンや曲げ操作を行うことで、ねじりを加えた形状など、本研究で設計不可能な曲面形状も制作できる。提案手法では、サンプルの曲げ形状計測において、スリットパターンの長さや曲げ角度に応じたデータを計測していた。そのため、平面部分のねじり角など、データを区別するパラメータの種類を増やすことで、より多くの種類の形状に対応した、曲面形状の最適化が可能となる。しかし、スリットパターンと異なるパターンを用いる場合などにおいて、データを区別するパラメータの種類が増加す



ると、曲げ形状の計測回数も比例して増加する。そのため、必要最小限の計測で済むようなパラメータの設定が課題となる。

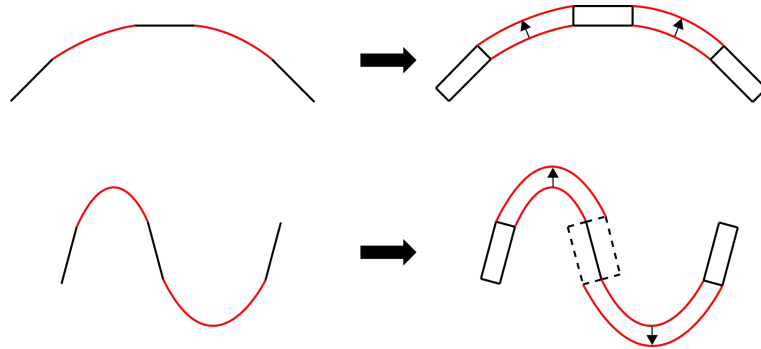


図 5.1: 曲面部品の厚みの考慮例。左図はインタフェース中の厚みを考慮していない部品を表し、黒線は平面部分、赤線はスリット部分を示す。右図は厚みを付与した結果を表す。上図では曲面部品全体が凸な形状であるため、厚みを付与した後も形状の整合性が保たれている。下図では曲面部品全体が凸な形状ではないため、中央の平面部分の厚みを決定できない。

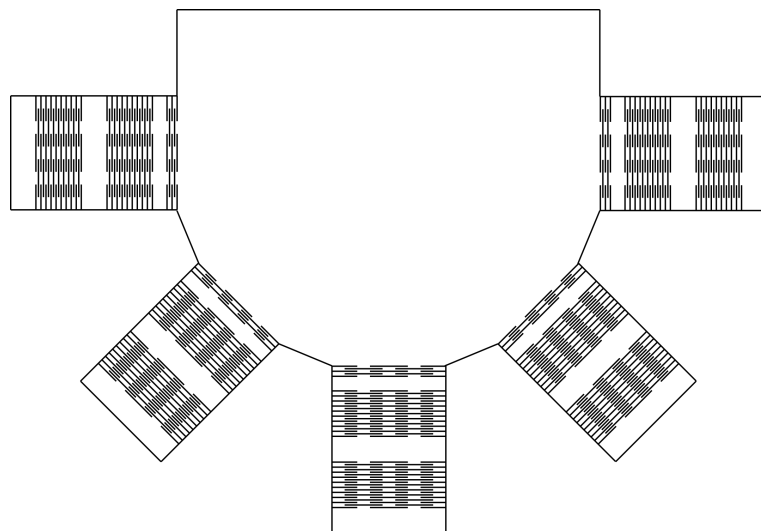


図 5.2: 平面部品と曲面部品を接続した展開図の例

## 謝辞

本論文の執筆に当たり三谷純先生、金森由博先生、遠藤結城先生には多くのご指導、ご助言をいただきました。特に三谷純先生には研究内容から、私生活に関することまで多くのご指導を頂きました。心より深く感謝いたします。また、非数値処理アルゴリズム研究室の皆様には、日頃から多くの研究に関する有益なご意見をいただきました。ここに感謝いたします。本研究では、本学の openfab 創房に設置されたレーザーカッターで素材の加工を行いました。openfab 創房の皆様には、機材の貸し出しや加工方法についての助言などのご協力をいただきました。ここに感謝いたします。最後に、これまで自分を支えてくれた両親に心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] アクリサンデー株式会社. アクリサンデー株式会社 : アクリル板加工方法 [曲げ]. <http://www.acrysunday.co.jp/howto/03.html>, (参照 2018-1-11).
- [2] アイダエンジニアリング株式会社. プレス機械ってなに? | 株主・投資家情報 | アイダエンジニアリング株式会社. <http://www.aida.co.jp/ir/person/pressmachine.html>, (参照 2018-2-13).
- [3] 竹下春日. 現代の名工がハンマー 1 本で新幹線の顔を叩き出す:(株) 山下工業所の打出し板金の技術. 塑性と加工, 2013, 54.624: 40-45.
- [4] Ukrainian Gears LLC. Unique Wooden Mechanical Models «UGears Models». <https://ugearsmodels.com/>, (参照 2017-12-20).
- [5] 王子ホールディングス株式会社. 緩衝シート及び収納容器. 特開 2016-164077 号, 2016-9-8.
- [6] Jun Mitani. A Design Method for 3D Origami Based on Rotational Sweep. *Computer-Aided Design and Applications*, 2009, 6.1: 69-79.
- [7] Idan Shatz, Ayellet Tal, George Leifman. Paper Craft Models from Meshes. *The Visual Computer*, 2006, 22.9: 825-834.
- [8] Varun Perumal C, Daniel Wigdor. Foldem: Heterogeneous Object Fabrication via Selective Ablation of Multi-Material Sheets. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2016: 5765-5775.
- [9] J.M. Gattas, Z. You. Design and digital fabrication of folded sandwich structures. *Automation in Construction*, 2016, 63: 79-87.
- [10] Jason S. Ku, Erik D. Demaine. Folding Flat Crease Patterns With Thick Materials. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016, 8.3: 031003.
- [11] Ruslan Guseinov, Eder Miguel, Bernd Bickel. CurveUps: Shaping Objects from Flat Plates with Tension-Actuated Curvature. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2017, 36.4: 64.
- [12] Mélina Skouras, Stelian Coros, Eitan Grinspun, Bernhard Thomaszewski. Interactive Surface Design with Interlocking Elements. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2015, 34.6: 224.

- [13] Koryo Miura. The science of Miura-ori: A review. 4th International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education, RJ Lang, ed., AK Peters, Natick, MA. 2009: 87-100.
- [14] Taisuke Ohshima, Tomohiro Tachi, Hiroya Tanaka, Yasushi Yamaguchi. Analysis and design of elastic materials formed using 2D repetitive slit pattern. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, 2015.
- [15] Orkan Zeynel Güzelci, Zeynep Bacinoğlu, Sema Alaçam. Enhancing Flexibility of 2D Planar Materials By Applying Cut Patterns For Hands On Study Models. Blucher Design Proceedings, 2016, 3.1: 1-6.
- [16] Taisuke Ohshima, Takeo Igarashi, Jun Mitani, Hiroya Tanaka. WoodWeaver: Fabricating curved objects without moulds or glue. eCAADe 2013: Computation and Performance—Proceedings of the 31st International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Delft, The Netherlands, September 18-20, 2013. Faculty of Architecture, Delft University of Technology; eCAADe (Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe), 2013.
- [17] F. Pérez, J.A. Suárez. Quasi-developable B-spline surfaces in ship hull design. Computer-Aided Design, 2007, 39.10: 853-862.
- [18] Amaury Jung, Stefanie Hahmann, Damien Rohmer, Antoine Begault, Laurence Boissieux, Marie-Paule Cani. Sketching Folds: Developable Surfaces from Non-Planar Silhouettes. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34.5: 155.
- [19] Chengcheng Tang, Pengbo Bo, Johannes Wallner, Helmut Pottmann. Interactive Design of Developable Surfaces. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2016, 35.2: 12.
- [20] 細田翔, 三谷純, 金森由博. 可展面間の交差に基づくトリム処理を組み入れた対話的紙模型用形状構築システム. 第77回全国大会講演論文集, 2015, 2015.1: 77-78.
- [21] L. Zhu, T. Igarashi, J. Mitani. Soft Folding. Computer Graphics Forum. 2013: 167-176.
- [22] Yunbo Zhang, Wei Gao, Luis Paredes, Karthik Ramani. CardBoardiZer: Creatively Customize, Articulate and Fold 3D Mesh Models. Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2016: 897-907.
- [23] Yuliy Schwartzburg, Mark Pauly. Fabrication-aware Design with Intersecting Planar Pieces. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd, 2013: 317-326.
- [24] Stefanie Mueller, Bastian Kruck, Patrick Baudisch. LaserOrigami: Laser-Cutting 3D Objects. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2013: 2585-2592.

- [25] Dustin Beyer, Serafima Gurevich, Stefanie Mueller, Hsiang-Ting Chen, Patrick Baudisch. Platener: Low-Fidelity Fabrication of 3D Objects by Substituting 3D Print with Laser-Cut Plates. Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2015: 1799-1806.
- [26] Pengbo Bo, Wenping Wang. Geodesic-Controlled Developable Surfaces for Modeling Paper Bending. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd, 2007: 365-374.

# 付録A 試作した立体構造の展開図

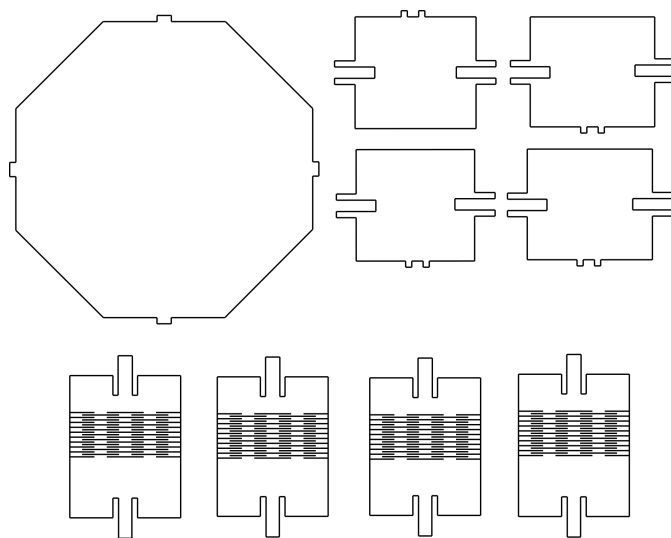


図 A.1: 図 4.1 上段の展開図

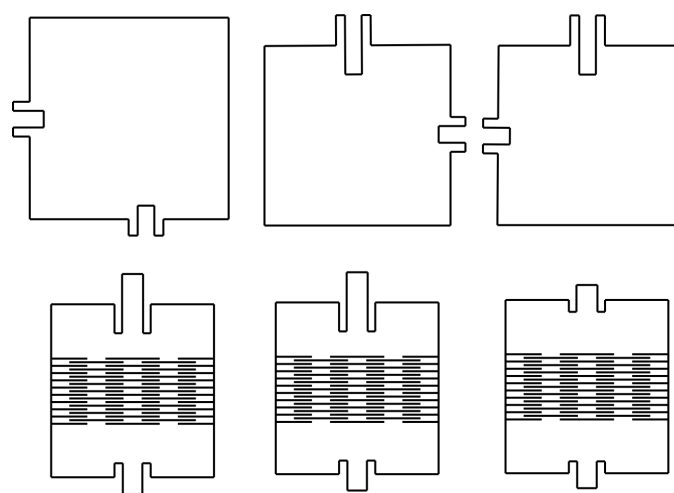


図 A.2: 図 4.1 下段の展開図

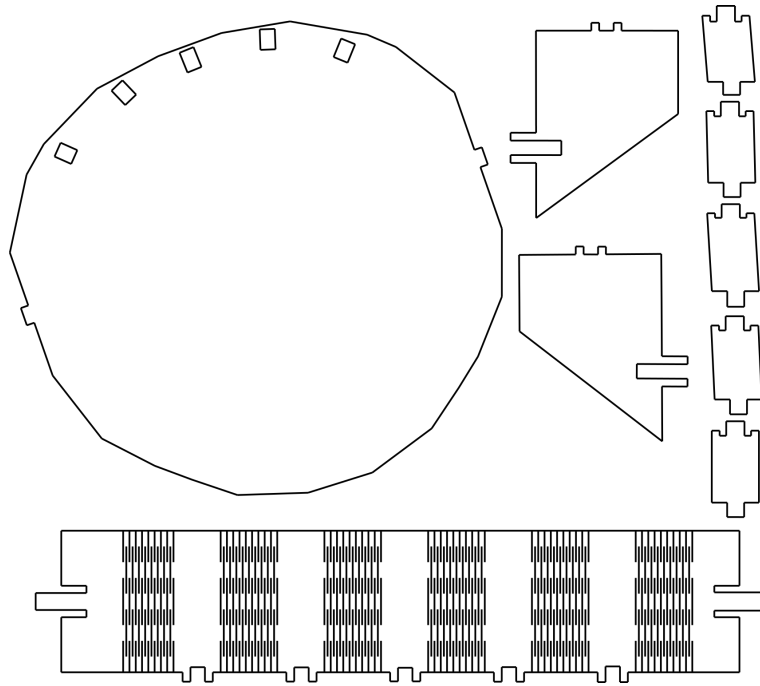


図 A.3: 図 4.2 上段の展開図

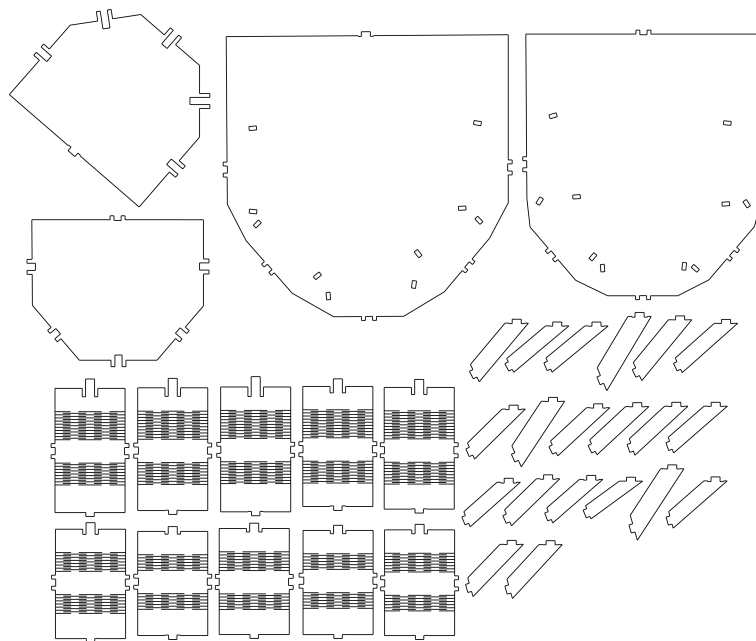


図 A.4: 図 4.2 下段の展開図