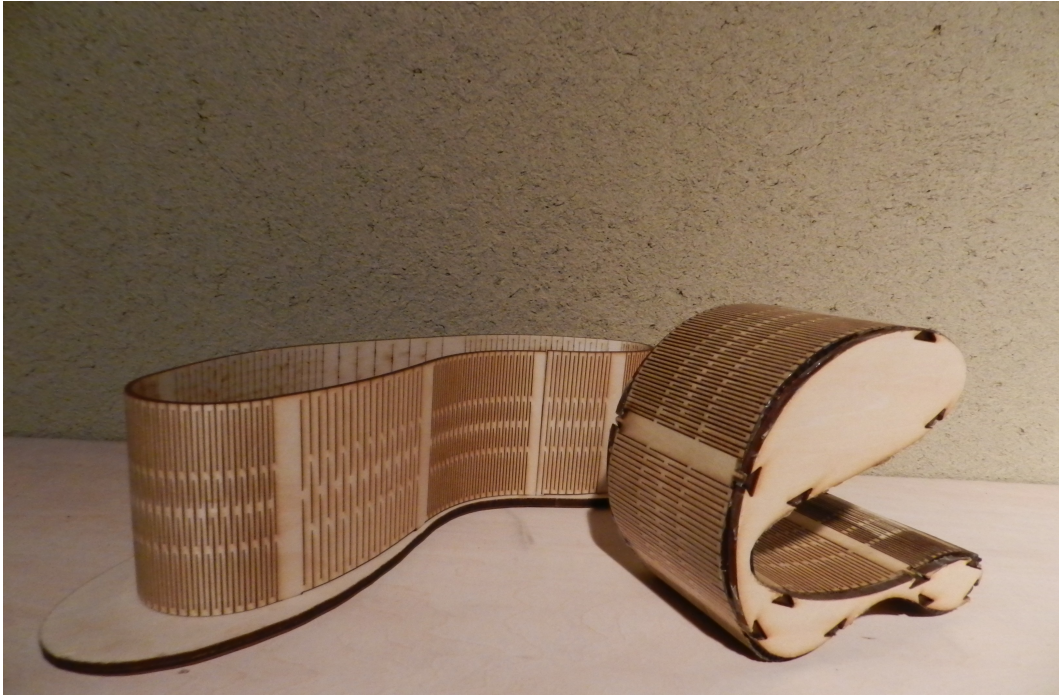




Computation and Fabrication of Soft wood objects

1. Design and Fabrication of parametric curve with plywood
(合板による任意のパラメトリック曲線的设计・製作手法の提案)
2. Design and Fabrication of convex polyhedron with modular construction (2次元の部材を組み合わせによる、
任意の凸多面体の设计・製造手法の提案)



概要

本論文では、木材（主に合板）を用いた、3次元形態の造形手法の提案を行う。1つはコンピュータ上で設計したパラメトリック曲線を合板の曲げによって実現し、実物モデルを構成する手法の提案を行う。もう一つは、任意の凸多面体を2次元の板材の組み合わせで構成する手法の提案を行う。2つの手法とともに、筆者が開発した設計支援システムを紹介する。

目 次

1.Design and Fabrication of parametric curve with plywood

- 概要
- 工学としての digital fabrication
- 既存の曲げ木と digital fabrication における曲げ木
- パラメトリック曲線について
- 本システムについて
- 実物モデルの近似誤差
- 材料実験（未完）
- 展望と課題

2.Design and Fabrication of convex polyhedron with modular construction

- 概要
- Computer Graphics と Digital Fabrication
- 関連する工法
- 設計システム
- 製作実験
- 展望と課題

3. 総括 ~Integration of Geometry,Material Mechanics, and Construction~

Design and Fabrication of parametric curve with plywood

概要

板状の木材に特定のパターンをカットすることで材料の持つ弾性および曲げ許容度を変化させることができる。この手法を用いて、任意のパラメトリック曲線を合板の曲げによって実現するシステムを開発した。このシステムでは曲線の曲率に応じた切り込みパターンを生成し、システムと対話的に曲線の微調整や切り込みパターンの設定を行う。与えられた曲線を実現するために必要な曲げ許容度を持つ合板を切り込みパターンによって実現する。

背景~工学としての digital fabrication~

Computer-Aided-Design-and-Manufacturing (CAD/CAM) とは計算機による設計技術(CAD)および製造技術(CAM)の総称である。この設計・製造技術の発達と同時に Computer Aided Engineering(CAE)と呼ばれる、製造物の安全性・妥当性をコンピューターシミュレーションによって解析、検証する技術が発達した。これらの技術は現代の産業を支える基盤技術となっている。

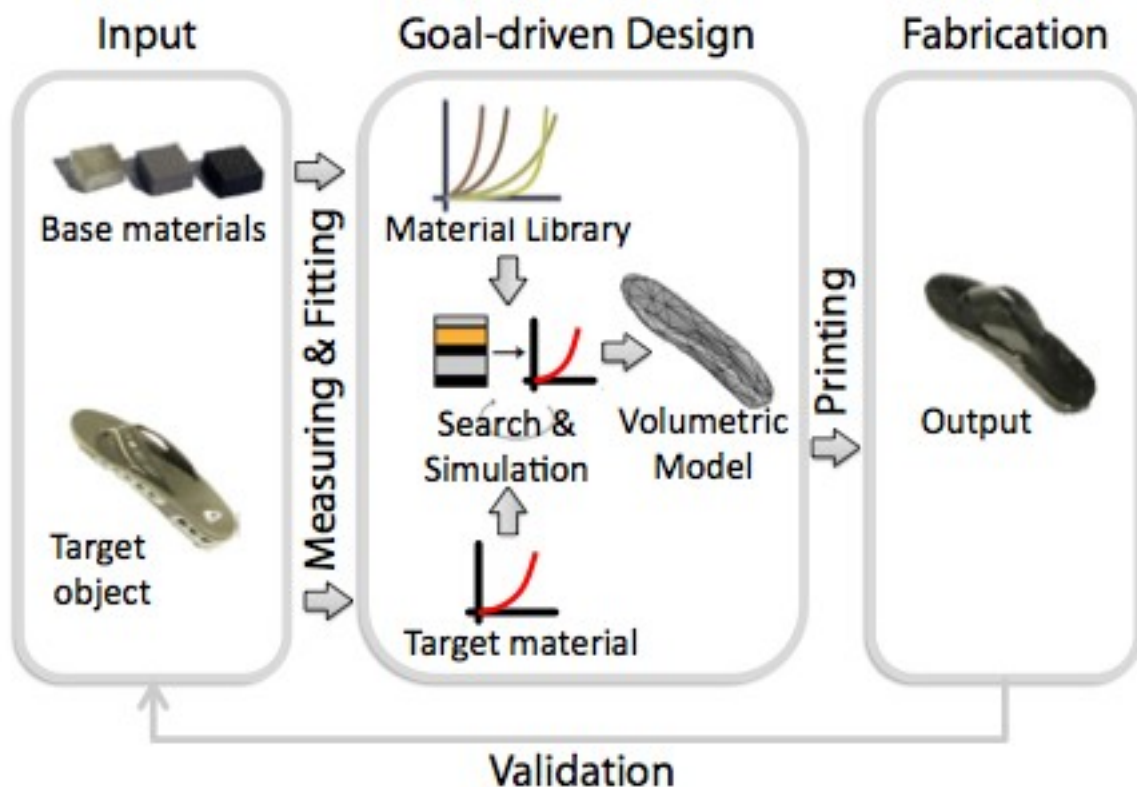
一方、近年、CAM の技術発展に伴い、デジタル制御の工作機械が低価格化・高性能化した。これと同時に計算機の高性能化・簡易化により産業や研究機関で一部の人間のみに利用されることが多かった CAD//CAE/CAM の技術が、デザイナーや工芸家、建築家などの多種多様な人々に利用されるようになった。(これらの CAM 技術は別称して digital fabrication と呼ばれる)彼らはこれまで分離されがちであった、CAD/CAE/CAM のプロセスをシームレスに行き来し、これらを統合するようにプロダクトを生み出している。このような統合的な創作活動は逆説的に、CAD/CAE/CAM 技術を生み出した工学にも影響を与えつつある。以下に、工学的研究として CAD と CAE を統合した事例と CAE と CAM を統合した事例を紹介する。

梅谷信行氏はCADとCAEの統合による可能性を研究している。

彼は、鉄琴を構成する鉄板（音盤）の設計支援システムを開発した。[1] このシステムは音盤の形態設計と同時にFEM(Finite Element Method)による固有値解析を行うものである。これによって、音盤の設計と同時に音盤を叩いた際の周波数（音）をリアルタイムに確かめることができる。このシステムを用いて、既存の長方形の音盤以外の多様な形の音盤を設計することができる。これまで、CAD/CAE技術は分離され、CAE技術は製造物の安全性・妥当性の検証のみに使われていたが、CADとCAEを統合することで、設計用件を保証した上で形態を探索し、多様な形態を実現することができる。



Bernd Bickel らの研究は、任意の変形特性を持った非線形のゴム素材を、3Dプリンタで製作するシステムである[2]。この研究では先ず、複数の小さな穴を持つゴムのキューブを3Dプリンターで出力し、穴の個数・形状によって異なる弾性のゴムキューブを用意する。その後それらを層状に重ねることで目的の変形特性を実現する。このプロセスの中で、重ねるべき材料の変形特性を実験によって測定し、その結果を反映させ解析モデルを洗練させる。層の重ね方を最適化し目標の変形特性を実現している。



ここでは、CAM 技術の発達により、短時間で、実験と解析のサイクルを回し高精度な解析モデルを構築している。さらに、計算機によって弾性体の解析、重ね合わせるゴムの組み合わせの最適化を行う。最終的に目的とする”やわらかさ”のゴムを実現している。この研究は CAM と CAE 技術を統合した事例と言える。これら 2 つの研究はともに、ある特定の目的を達成するために、目的に応じて CAD /CAE /CAM を統合し設計支援システムを構築している。

本論文では、曲げ木を行うための CAD と CAE を統合したシステムを提案する。2次元の板材（合板）にレーザーカッターを用いて、特定のパターンをカットすることで材料の持つ弾性および曲げ許容度を変化させることができる。この手法を利用し、コンピュータ上で設計したパラメトリック曲線を合板の曲げによって実現するためのシステムを構築した。このシステムでは、曲線の曲率を解析し、曲率に応じて切り込みパターンを生成する。加えて、ユーザーはシステムと対話的に曲線やパターンの微調整を行うことができる。この対話的なシステムによって、材料特性による制約を加味した、曲線の設計が可能となる。曲率応じた切り込みパターンを生成することで、製造コストを抑え、強度損なうことなく多様な曲線を製造できる。なお、パターンによる、弾性の変化を簡易的な実験によって観測することができた。

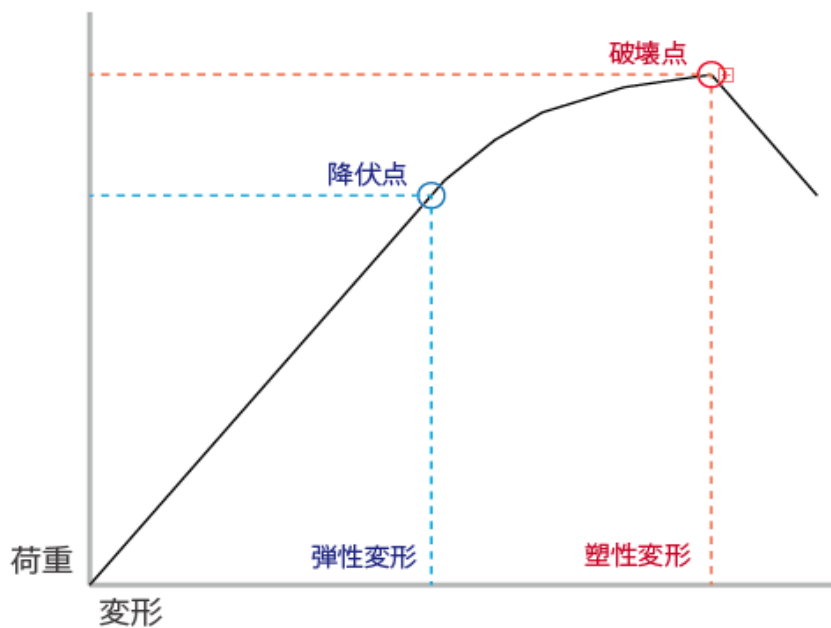
関連工法・研究 ～既存の曲げ木と digital fabrication における曲げ木～

曲げ木の手法は、伝統工芸や製造技術として既に様々なものが存在する。これらの手法は、大きく 3 つに整理することができる。

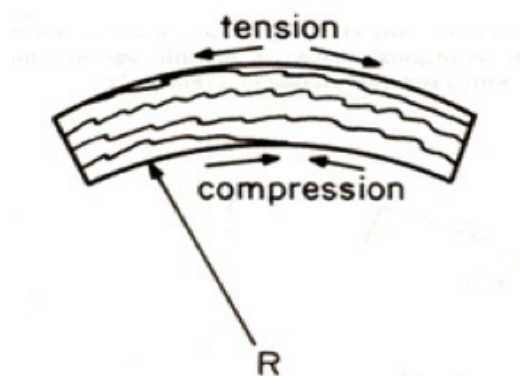
- 1.木材を蒸す・煮沸することで曲げる。[Steam bending]
- 2.Kerf Cut で曲げる。（Kerf Cut とは溝の様に切り込みを入れること）[Kerf-cut bending]
- 3.薄く加工した木材を積層することで曲げる。[laminare bending]

これらの手法を紹介する前に、木材の基本的な性質を述べる。

木材は、弾性・塑性を併せ持つ素材である。以下のグラフのように、弾性限界までは加重と変異が比例関係にあり、線形変形となる。降伏点を過ぎると、塑性変化となり荷重をゼロにしても変形を保持する。そして、破壊点に達すると材は破壊される。



(図 1.1)



(図 1.2) ここでは曲げ変形を対象とする。曲げ変形は上の図のように、外側には張力が働き、内側には圧縮力が働く。

Steam Bending の手法は、塑性変形の領域で木材の曲げ加工を行う。この手法を用いることで、曲げ圧縮時では、少ない力でも塑性変形となり、強い荷重に対しては破壊しにくい材となる。すなわち、上の図 1.1 の塑性変形の領域が広がり、圧縮による変形をより許容する材となる。しかし、張力に対してはこのように塑性変形の領域が広がらない。そのため、図 1.2 で示されるように曲げの外側では、材料が破壊されにくくなるわけではない。この問題の解決策として、以下の図のように木材の両端に金具を設置し、材を曲げても、外側の張力による歪みがほとんど発生しないようにする。



つまり、内側の圧縮による歪みは許し、外側の張力による歪みは最小限にとどめるように金具を両端に設置する。ここで紹介した手法はミヒヤエル・トーとネット氏が考案し、産業に広く普及した。

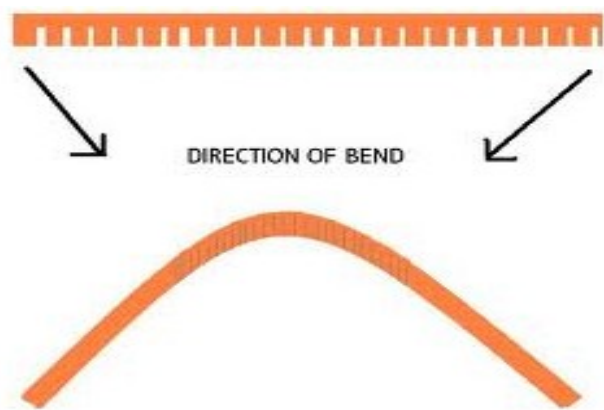
この手法以外にも、伝統工芸として江戸時代より伝わる曲げ木のは Steam Bending と同様の手法で木材の曲げ加工を行っている。

step1. 薄く切り出した短冊状の木材を 15 分ほど煮沸させることで曲げに対して
壊れにくい材をつくる。

step2. ゴロと呼ばれる丸太で板を巻き込み、丸みをつける。ゴロには、製品のサイズ、形
ごとに多くの種類がある。

step3. その後、両端部を仮止めし、およそ 2 日間乾燥させ、最後に両端を接合することで、
自然な円形・楕円形の曲げができ出来上がる。

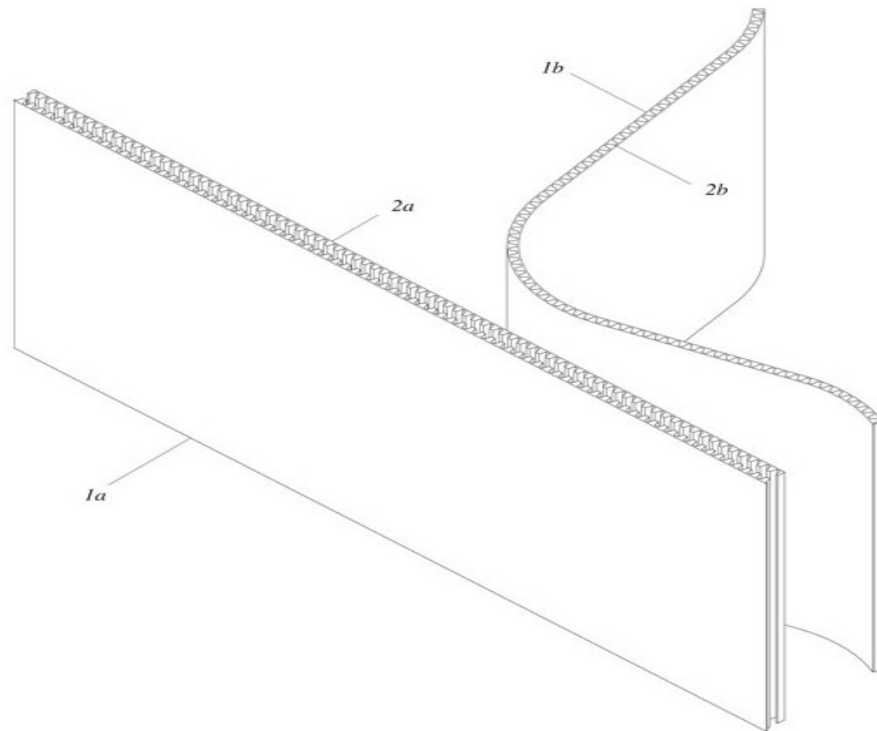
Kerf cutting は、木材に対して下図のような溝穴をあけることで、曲げ加工を行う。この
溝がおのおの圧縮による歪みを持つため、曲げを作ることができる。



Laminate bending は、薄いシート上の木材の曲げやすさを利用し、曲げ加工を行う。その
後、シート状の材を積層し、接着することで強度を持った曲げ材をつくる。

次に digital fabrication における曲げ木の手法を紹介する。

“Design To Production”というスイスの会社による"zip shape"は以下の図にあるような2つの平板を接着剤によってつなげることで曲げ加工を行うと同時に同時に形を固定する。このシステムの特徴は、曲げを構成するための特別な型なしで曲げ加工が可能な点である。



以下、製作のプロセスを解説する。設計者は与えられたパラメトリック曲線の制御点を操作することで曲線を設計する。同時にその曲線に応じた溝穴(kerf)のパターンがソフトウェアによって自動生成される。その後、そのパターンに応じて平板を加工し、2つの平板を接着することで目的とする曲線が実現される。



最後に本研究の手法を紹介する。

先ず木材に以下のようなパターンで、切り込みを入れることで合板の弾性を変化させる。

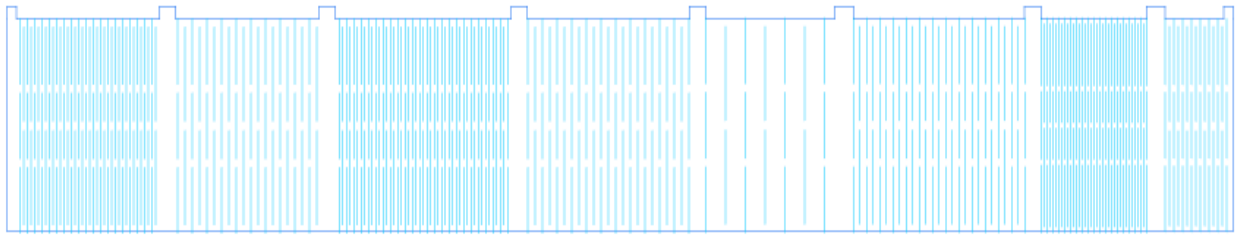
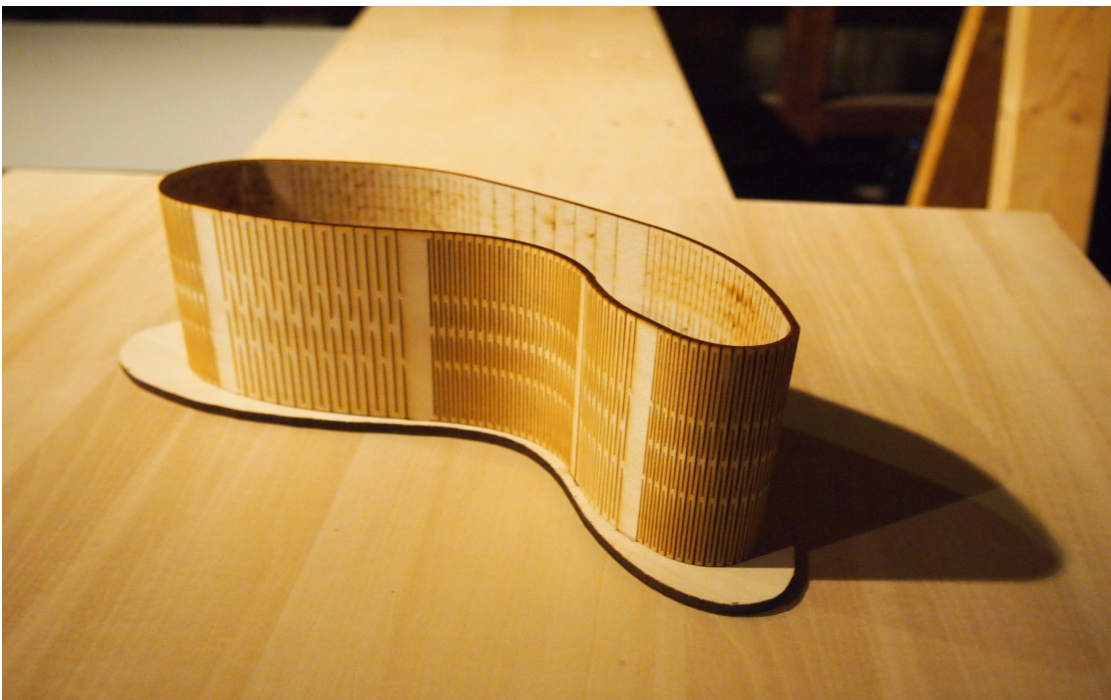
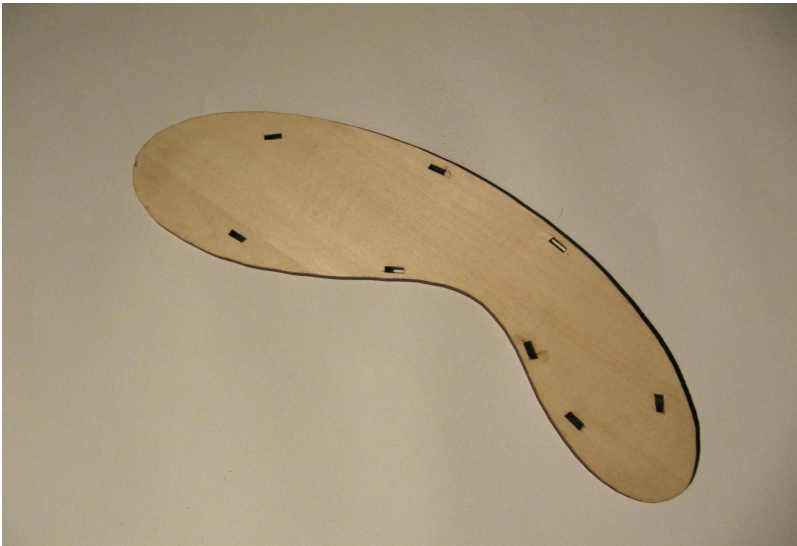
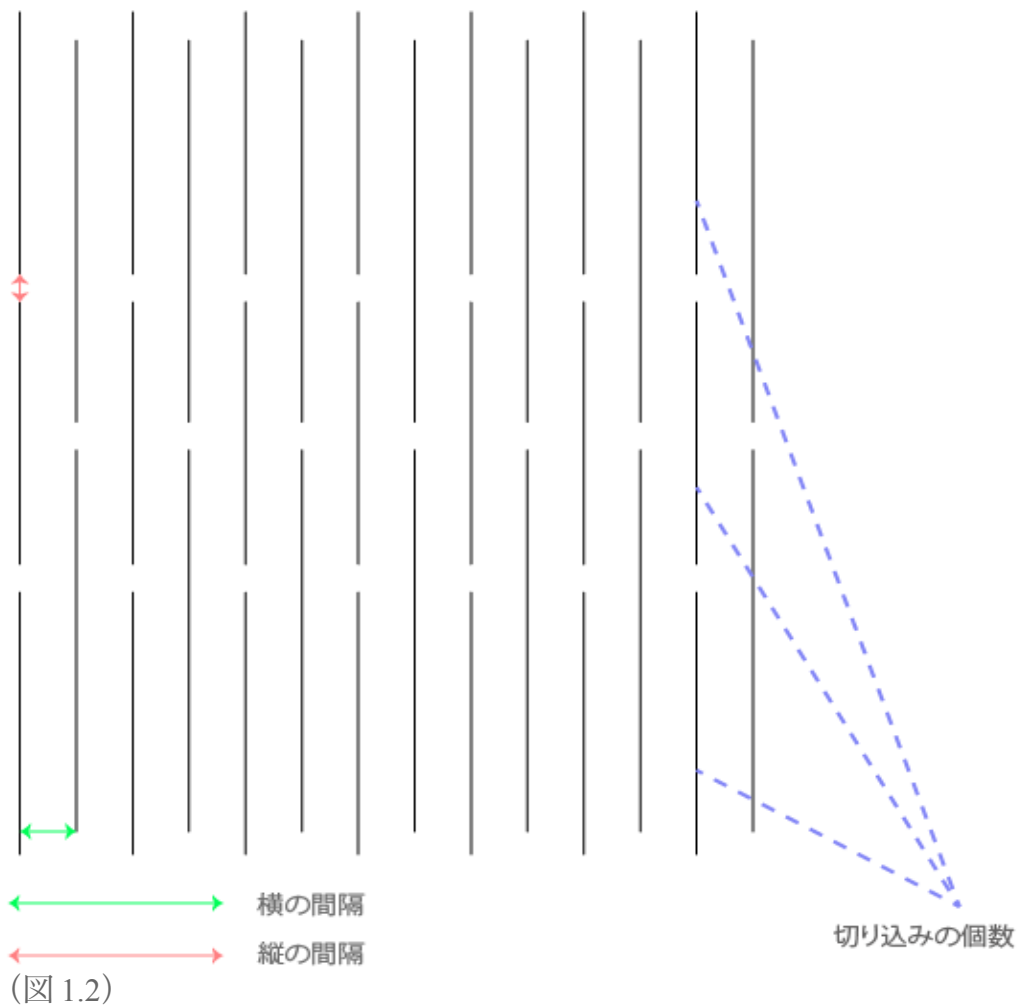


図 1.1 における弾性変形領域を拡張し、弾性変形として材を曲げやすい材料に加工する。
レーザカッターで切り出された型に上のストライプ上の材料を曲げながらはめることで目的とする曲線の曲げを実現する。



曲げる材に刻む切り込みパターンは線同士の横の間隔、縦の間隔、縦線の個数と3つのパラメータを持つ。これらのパラメータを変化させることで木材の弾性のある程度コントロールできることが実験によって確認された。



この性質を利用し、曲線の設計と同時に、その曲線を実現するために、曲率に応じた切り込みパターンを設計・生成するシステムを開発した。”設計・生成”というのは、計算機で自動生成した際、もしエラーがあった場合、設計者が図面やパターンをシステムと対話的に微調整（設計）できるということである。

類似の工法との比較

・加工方法の比較

digital fabrication を用いない既存の曲げ木の手法は steam bending、laminate bending と kerf cut bending の3つに分けることができる。この2つのうち steam bending と laminate bending は塑性変形による曲げ加工であり、両方とも型をつかうことで曲げを固定する。この手法は加工時間が大幅に掛かるものの、強度をあまり損なわない曲げの加工ができる。Kerf cut bending は、本研究と最も類似した曲げ加工である。Kerf cutting は特定の方向に曲げ加工を行う場合に有効である。本研究も kerf cut bending 同様切り込みによって曲げ許容度を変化させる。しかし、kerf cut bending と異なり材料をカットするパターンを刻むことで、材料を複数方向に曲げることができる。さらに、本研究のカットパターンによる曲げは、レーザーカッターを用いることで非常に短時間で目的とする曲げを実現できる。

・設計支援ソフトウェアの比較

zip shape は kerf cut bending の方法を応用した工法で曲げ加工を行っている。設計支援システムとしての zip shape をみると、パラメトリック曲線に応じて、kerf cut のパターンを自動生成するアルゴリズムをつくり、設計者はパラメトリック曲線を作成すれば、それを zip shape として実現できる。しかし、そこでは材料の曲げ許容度を解析・考慮されておらず設計者は暗黙のうちに、材料の曲げ許容度を予想して曲線を設計する必要があった。本システムでは、ベジェ曲線の曲率・曲率半径をビジュアライズしつつ、材料の曲げ許容度を局所的に変化させることができる。そのため、複雑な曲げをもつ曲線でも、合板の曲げで実現可能である。

パラメトリック曲線

本章では、本設計システムで用いられる曲線の性質について解説する。

パラメトリック曲線とは、任意の連続値を持つ独立変数: t (ここでは便宜上 t とした) に対して、ユーグリッド空間上で2次元の場合なら $(x(t), y(t))$ の対、3次元の場合なら $(x(t), y(t), z(t))$ を対応させる関数のことを指す。

パラメトリック曲線はなめらかな曲線をコンピュータ上で設計する際に利用されてきた。本研究では、その中でも特にポピュラーなベジエ曲線を用いて滑らかな曲線の設計・製作を行う。ベジエ曲線とは以下の式で定義されるパラメトリック曲線の1つである。[3]

制御点を $\mathbf{B}_0, \mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_{N-1}$ とすると、ベジエ曲線は

$$\mathbf{P}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{B}_i J_{(N-1)i}(t)$$

ここで $J_{ni}(t)$ は以下に定義されるバーンスタイン基底関数と呼ばれるものである。

$$J_{ni}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$$

(ここで $\binom{n}{i}$ は二項係数) として与えられる。

t が0から1まで変化する時、 $\mathbf{B}_0$ と $\mathbf{B}_{n-1}$ を両端とするベジエ曲線が得られる。本システムで頻出するベジエ曲線の曲率は以下のように定義される。

(図) 最後に調べてしっかり書く

$$\frac{P'(t)_1 P''(t)_2 - P''(t)_1 P'(t)_2}{(P'(t)_1^2 + P'(t)_2^2)^{\frac{3}{2}}}$$

曲線における曲率の形式的な定義は割愛するが、直感的には曲線の曲がり具合の指標となるものである。曲がりが急な場合は曲率の値も大きくなる。半径 r の円の曲率は $1/r$ である。曲率 k の逆数 $1/k$ を曲率半径と呼ぶ。本システムでは、ベジエ曲線を積分することで曲線の距離を求めている。ベジエ曲線の距離を求める積分は以下のように定義される。

$$d = \int_a^b \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2 + z(t)^2}$$

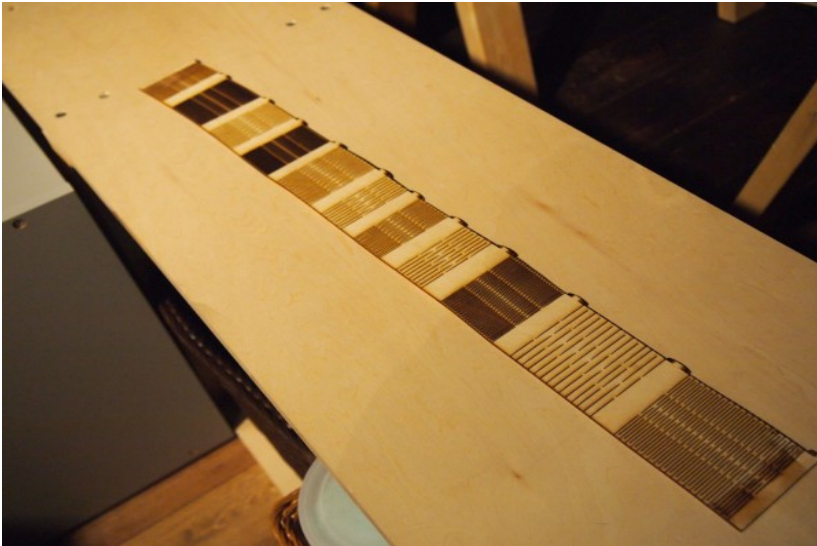
$a, b \in [0, 1]$ かつ $a < b$

2次元平面上のベジエ曲線の場合は、 $x(t), y(t)$ のみで考えればよい。

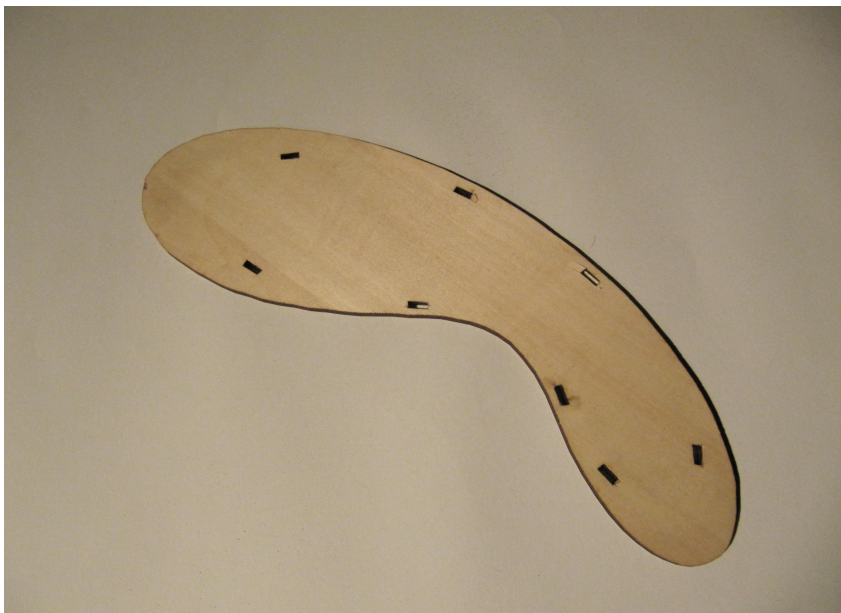
本システムについて

本システムは、合板の”曲げ”を用いて任意のベジェ曲線の実物モデルの製作を支援する。本章でははじめに、実物モデルの構成方法を記しその後に、設計のプロセスを述べ、最後に図面を生成するための理論について解説する。

本研究では、CG上で作成された任意個の制御点を持つベジェ曲線を合板で実現する。その際、”曲げ”を持つ部品と、その材の”曲げ”を固定する部品の2つで構成する手法を用いる。（以下曲げ材、型材）

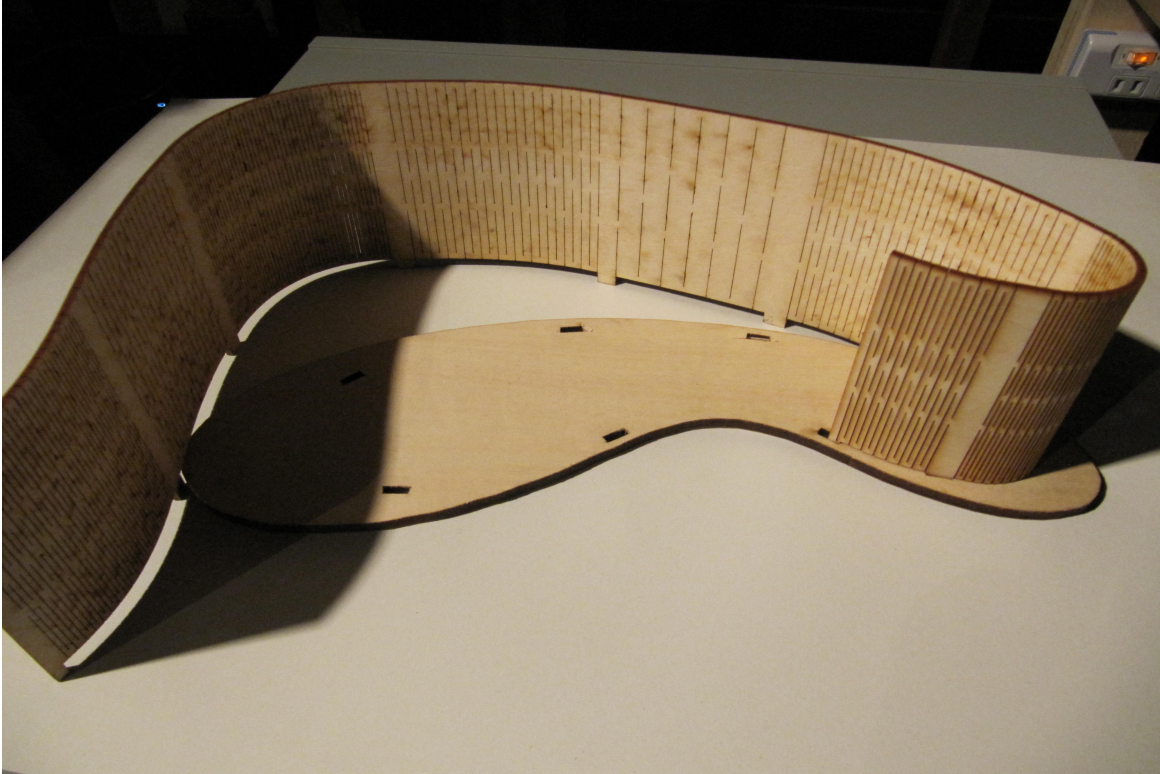


上の写真は曲げ材、下は型材である。

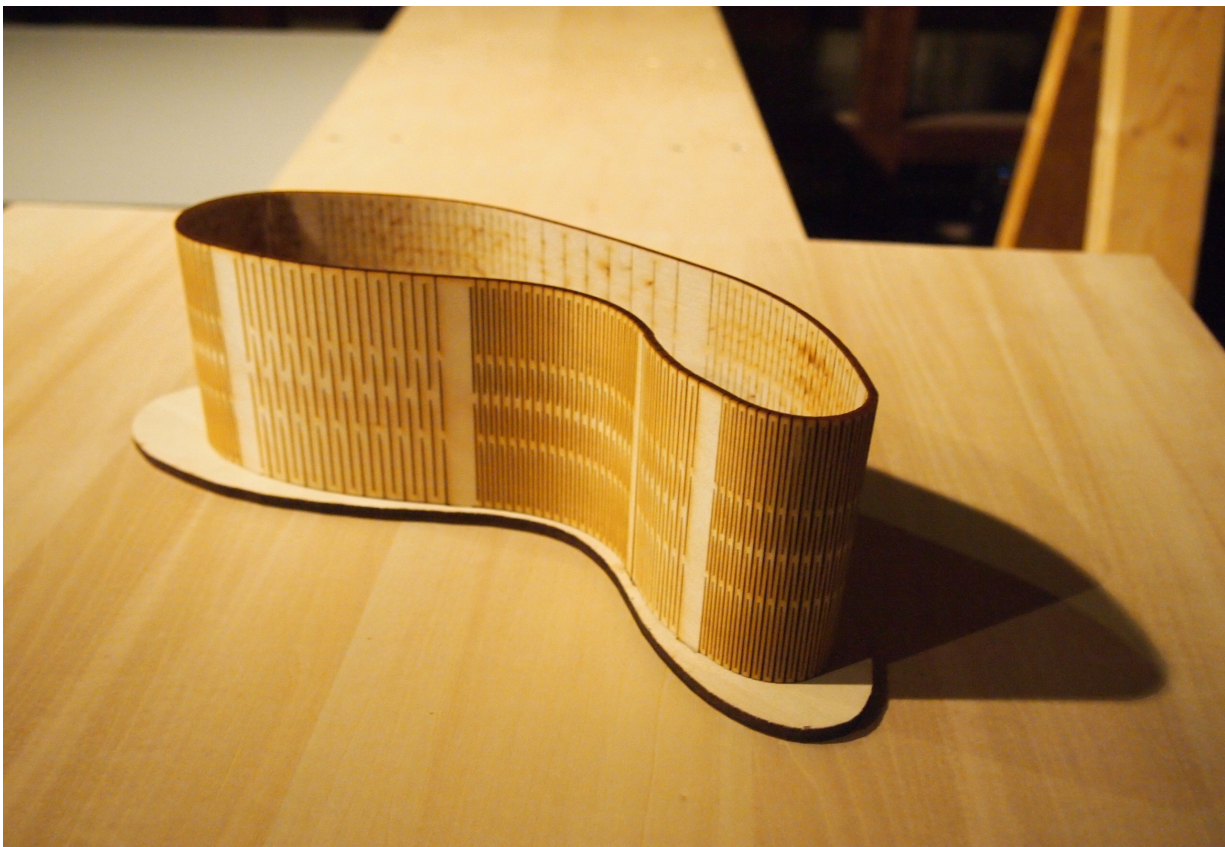


曲げ材は、カットパターンによって曲げやすい部分と、曲げにくい部分に分かれている。カットパターンをかえることで、曲げに対する許容度をある程度コントロールできる。そして、型材に曲げ材をはめ込むことで、与えられたたベジェ曲線の実物モデルを構成する。

・ 曲げ材を型材にはめる。

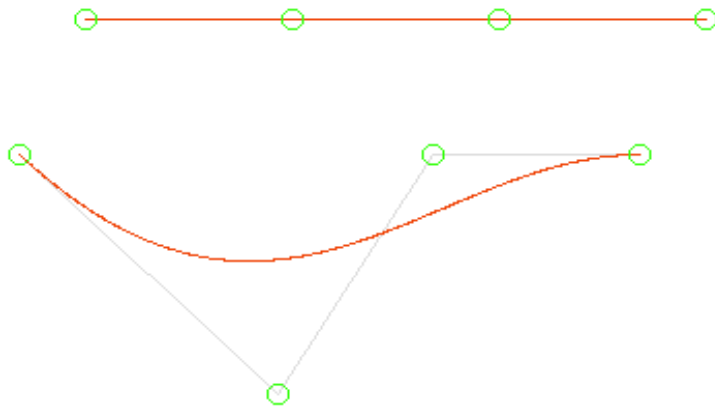


・ 完成

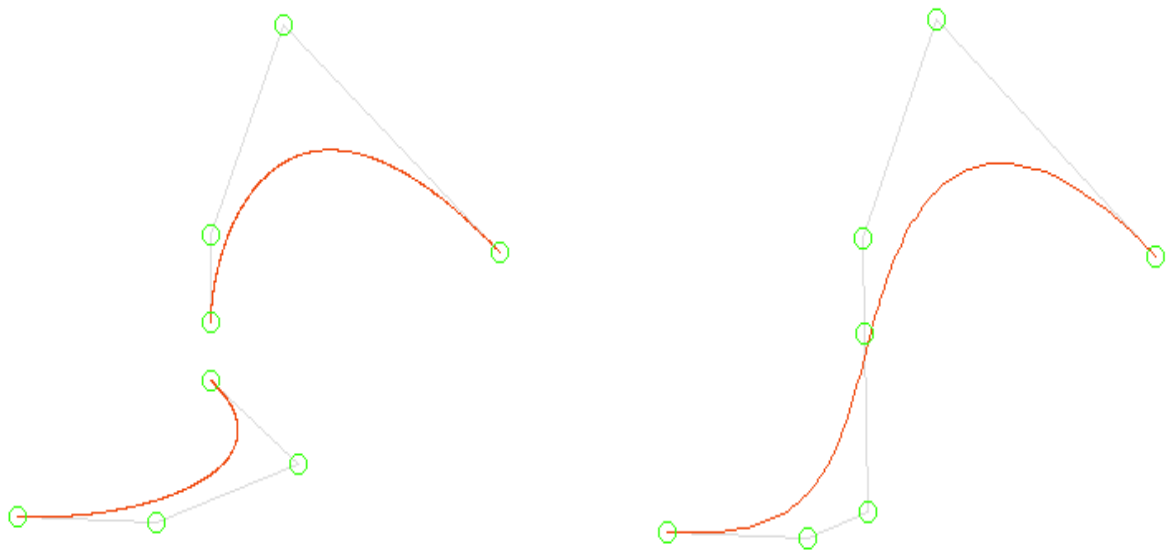


次にベジェ曲線の設計から、実物モデルの構成までのプロセスを述べる。

step1.ベジェ曲線を作成する。本システムでは、ストライプ上のベジェ曲線が初期状態として与えられ、その曲線の制御点をマウスで操作することで曲線を作成する。ベジェ曲線のストライプは、インターフェース上で追加し、曲線同士を接続することができる。ベジェ曲線の制御点の端点同士をつなげることで、2つのベジェ曲線を一つの曲線として扱うことができる。



* 2つの曲線が形状をあまり損なうことなく接続される。

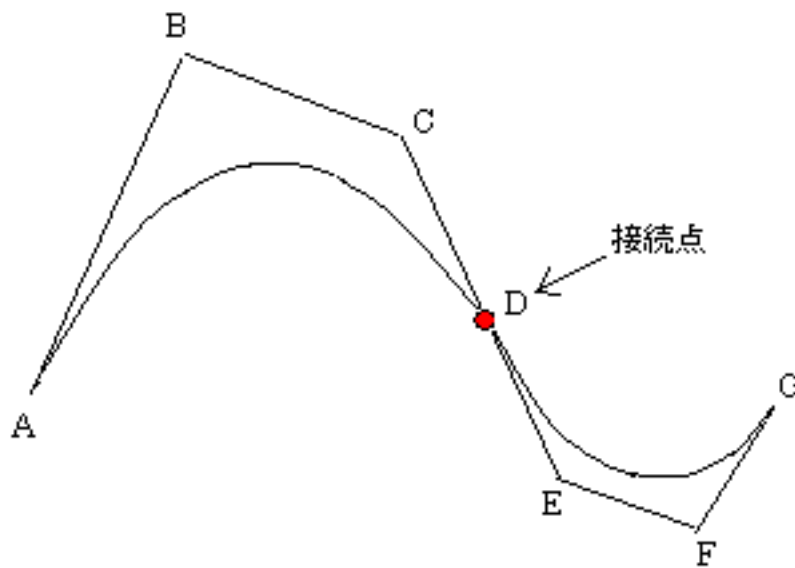


接続の際、つながれるベジェ曲線の制御点を以下のアルゴリズムのように、移動させることで、元の曲線の形状をなるべく損うことなく2つの曲線を接続することができる。

アルゴリズムの手順

1. 曲線の端部(D)を接続したい曲線の端部にドラッグアンドドロップする。
2. 制御点Dを挟む両側の制御点C,Eが一直線上になるように、接続する曲線の制御点を移動させる。（例えば、曲線ABCDを曲線DEFGに接続したい場合、Eを直線CDに移動させる。）

この1,2のアルゴリズムによって制御点Dでの傾きを一致させ、もとの曲線の形状を損なうことなく2つの曲線を接続することができる。

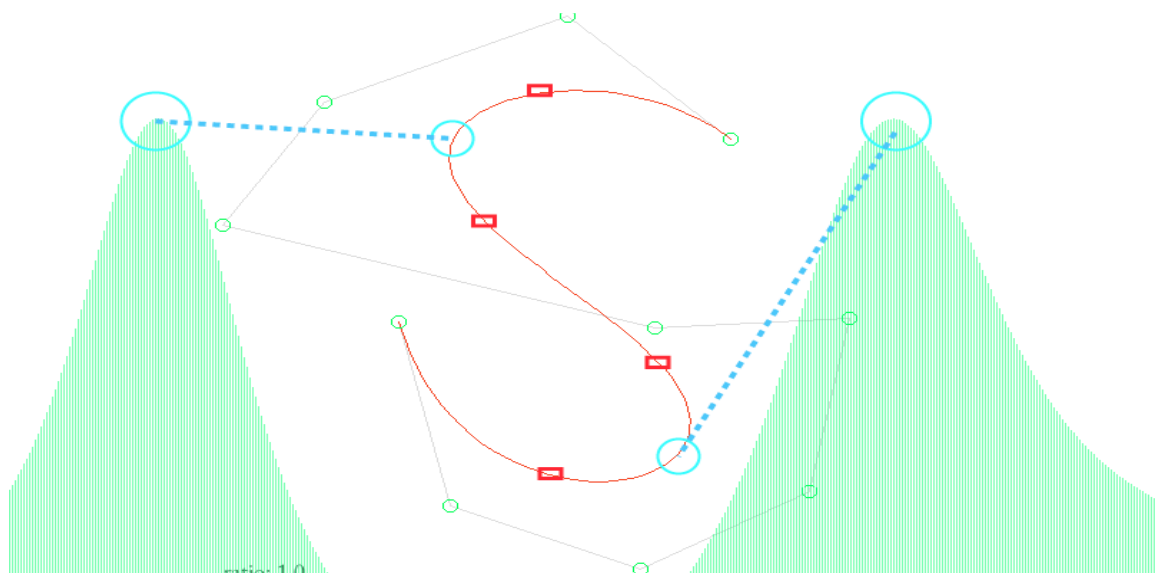


Step2. 曲線の曲率に応じて、接合部のポイントを決定する。

接合部を以下の図の水色の円が示す曲率の極大値となっている点を挟むように設置する。そうすることで合板が持つ弾性が作り出す自然な曲線で、与えられたベジェ曲線を近似的に実現することができる。同時に、接合部のポイントを設定することは曲線を分割する役割も果たす。曲線を分割することは次の step3 で役に立つ。

(なお、今後この " step2 " は自動化を目指す)

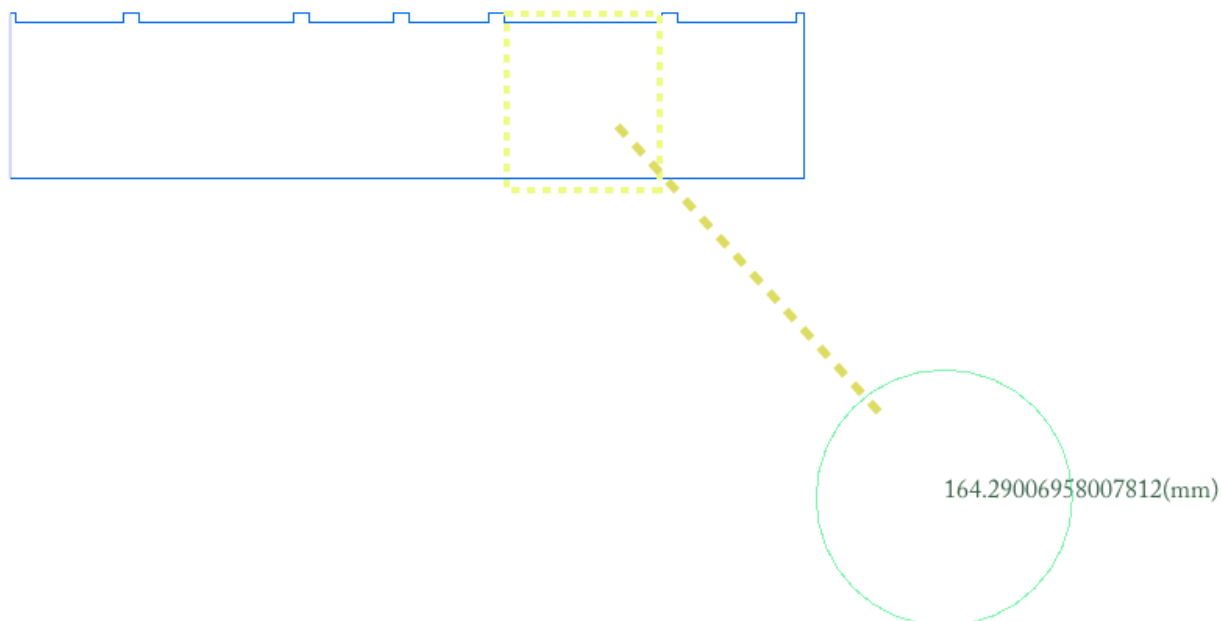
下の図で水色は極大値、赤い四角は接合部を示している。



step3.

曲げ材にカットパターンを割り振る。

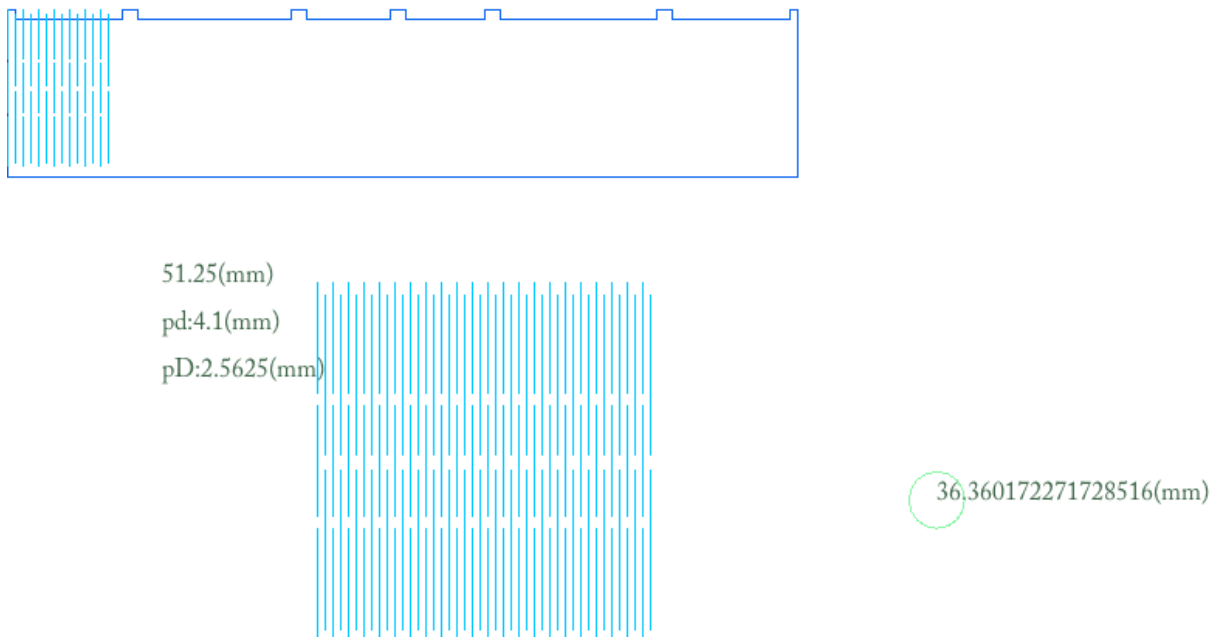
カットパターンは図 1.2 にあるように 3 つのパラメータによって制御される。曲げ材のある区間をクリックすることで、その区間での平均曲率半径が可視化される。平均曲率半径をみることで、注目している区間がどれほどの曲げを持つ必要があるかを直感的にかつ厳密に知ることができる。



Step4.

次に 設計者は、区間の平均曲率半径に応じてカットパターンを区間に割り振る。

区間にカットパターンをドラック・アンド・ドロップすることでパターンを割り振ることができる。



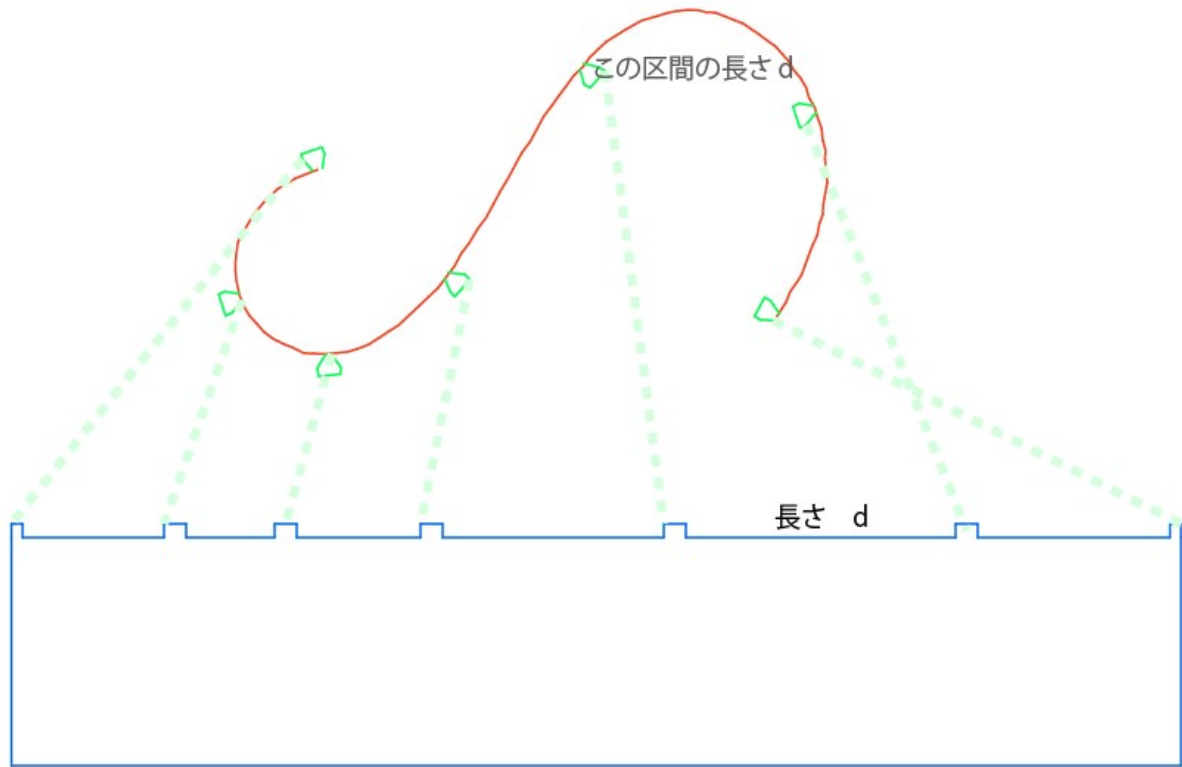
step5. 曲げ材の区間で、平均曲率半径があまりにも小さい（曲げが急である）場合は、設計者は、製作する実物モデルの大きさを大きくするか、曲線の作成段階（step1）にもどり曲率の少ない曲線を再度、作成する。

このように、曲線の設計と同時に曲率や曲率半径を可視化し、曲率に応じて、接合部やカットパターンを設定することで CG 上で作成した曲線から実物モデルをスムーズに作るができる。今後は、接合部の設定の自動化、カットパターンに応じた、曲げ許容度の解析を行う。そして曲線をの設計から実物のモデルを製作するプロセスの高速化・簡易化を目指す。

図面・生成の理論

曲げ材の接合部の生成アルゴリズムをここでは解説する。

本システムは、曲線を設計しその曲線の型となる材をつくり、その型材ストライプ上の曲げ材をはめることで実物のモデルを構成する。型材は、曲線とその接合部を図面として出力するのみであるが、ストライプ状である曲げ材の接合部の間隔の算出にはベジェ曲線を積分し、各々の接合部間の距離を正確に求める必要がある。



この図は、曲線上の各々の接合部間の距離が、ストライプ上の各々の接合部の距離に対応していることを示している。前章にて紹介通り、以下に $[0,1]$ 区間に含まれる任意の区間におけるベジェ曲線の積分は以下の式で定義される。

$$d = \int_a^b \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2 + z(t)^2}$$

$a, b \in [0,1]$ かつ $a < b$

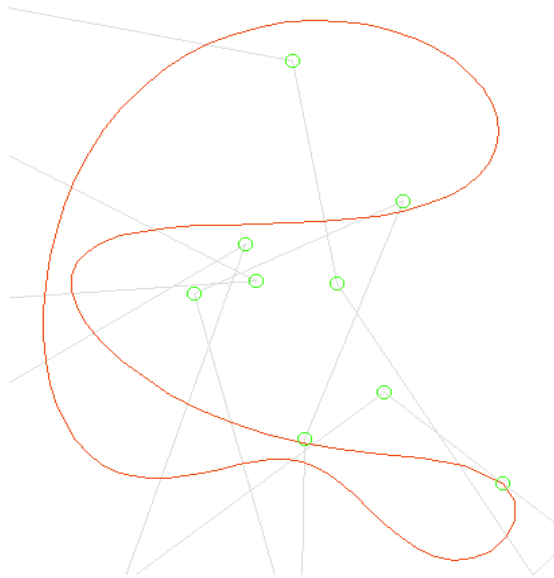
曲線の近似誤差

コンピュータ上のベジェ曲線と実物モデルの曲線との形の誤差をここでは論じる。加えて、誤差を少なくする方法を考察する。

先ず以下の写真のようにな実物モデルを製作した。



以下の写真でが一見、目的とする曲線の曲げが実現されているように見える。



しかし、局所的に拡大すると、以下の写真のように、曲げの誤差がみられる。



本システムでは、曲げ材の伸びを仮定していない。しかし、曲率の高い部位では、曲げ材の伸びは写真の大きくなる。従って上の写真のように、与えられた曲線と実物モデルとの間に誤差が生じる。この誤差をなくすためには、材料の伸び（弾性）を考慮した上で、図面を生成する必要がある。

展望と課題

カットパターンによって、材料（合板）の弾性を変化させる手法はまだ工学的には整備させているとは言えない。本研究でも、経験知としてパターンを決定し、パラメータを操作することで、“ある程度”材の弾性を変化させることにとどまっている。今後は、材料実験を重ね、材料に特定のパターンでカットを行った場合の弾性・破壊限界がどの程度正確に解析可能か否かを見極める必要がある。FEMによる解析やバネモデルなどの解析モデル同士の比較検討も材料実験とともに行う必要がある。その後、パラメトリック曲線から実物モデルまでのプロセスを可能な限り自動化・簡易化する。そうすることで、スケールが大きく複雑な曲線でも、実物モデルを構成可能であると筆者は考える。

2. Design and Fabrication of convex polyhedron with modular construction (2次元の部材を組み合わせによる、 任意の凸多面体の設計・製造手法の提案)

概要

paper craft や折り紙の工法を用いて CG モデルから実物のモデルをつくる手法の研究はこれまで行われてきた。本論文では digital fabrication を前提として、CG モデルから実物モデルの構成手法を提案する。Digital Fabrication を用いることで、paper craft や折り紙のように大きさに制約のある実物モデルではなく、大きさに制限のないモデルを構成することができる。2次元プロッターを用いて、複数の部材（以下モジュール）を切り出し、それらを90度回転させ組み合わせることで3次元の立体を構成することができる。本研究ではこの手法を一般化し、任意の凸多面体を構成するためのシステム”modularlizer”を開発した。modularlizer は入力として凸多面体のすべての頂点座標、すべての面において、面を構成している頂点座標の集合をを与える。そして、出力として多面体を構成する為に必要なモジュールの図面を生成する。さらに、本システムでは幾何学的には同じ凸多面体から、複数の素材特性をもつ実物モデルをパラメーターを変化させることで構成することができる。

Computer Graphics と Digital Fabrication

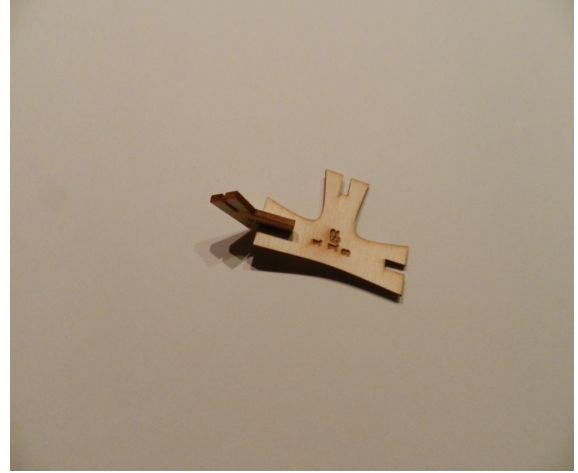
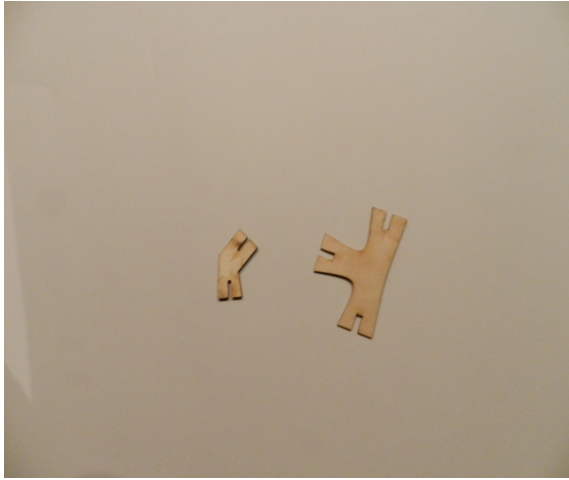
本章では先ず Computer Graphics(CG)として与えられたモデルを、実際の”もの”としてつくる (Fabricate) 手法の研究を紹介する。三谷純氏は、3角メッシュ化された3次元モデルを近似し、歪みのない複数の帯状のストライプに別けるアルゴリズムを考案した。そのアルゴリズムを用いて3次元モデルを帯状の紙で構成する手法を提案している。[4]

館智宏氏は、任意の多面体から折り紙の展開図を生成するアルゴリズムと、対話的な設計システムを提案している。対話的なシステムを用いることで、紙の厚みなど、物理的な制約を加味し実際に折ることが可能な展開図を設計することができる。[5] さらに同氏は、このシステムとウォータージェットカッターを用いて、アルミを紙のように加工し、複雑なポリゴンの実物モデルを製作した。

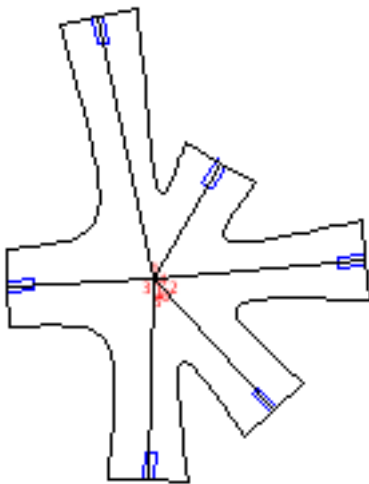
これら CG モデルから実物モデルを構成する手法は、CG 上の触ることのできないモデルから、Tangible(触れられる)モデルとして実物化するという意義に加え、その実物自体が芸術表現やエンターテインメントとしての価値を持っている。さらに、ある工法（つくりかた）において、形作ることのできるすべての形態を知ることはその工法の工学的な利用可能生・応用可能性を把握することでもある。

一方現在、世界各地で Digital Fabrication を用いて、様々な工法で多様な形態が作られている。しかし、現状ではある工法において、特定の設計者が形態にパラメータを与え、そのパラメータの範囲で形態の設計を行うのみである。ある工法でどこまで多様な幾何形態が実現可能かという命題を解いている例は非常に少ない。

本研究では Digital Fabrication を用いて、CG モデルから実物モデルの構成手法を紹介する。以下の写真にある様なモジュールを 2 次元プロッターによって切り出す、そしてこれらを 90 度回転させて組むことで 3 次元立体をつくることができる。



そこで、この手法を一般化し任意の凸多面体をこの手法で構成するシステムを開発した。入力として、凸多面体のすべての頂点と、すべての面において、面を構成する頂点の集合を与える。出力として、下の写真のようなモジュールのベクトルデータと図面を得る。このシステムでは、このモジュールの形態を設計者が自由に設計することができる。さらに、頂点を構成するモジュールに意図的に”たわみ”を与えることができる。”たわみ”によって、ジュール同士の接合部に反発力が加わりその力によってモジュール同士を接続することができる。モジュールのアセンブル（組み立て）を行う際に、凸多面体の頂点数が少ない場合は、加工されたモジュールを直感的に組み合わせていくことで、目的とする凸多面体を構成することが可能である。しかし、頂点の数が増えるとそれに応じてモジュールの数も増えたため、直感のみでモジュールを組み合わせ目的とする凸多面体を構成することは非常に困難となる。本システムでは、モジュールに ID 番号と接続の指示となる番号を刻印した。それによって製作者は、番号通りにモジュールを組み合わせるだけで、目的とする凸多面体を構成することができる。



関連工法

ここでは本研究で用いる手法に関連する工法を紹介する。

阿竹克人氏によるベンディグリティーは複数穴の開いた弾性のある棒にピンを差し込み棒同士を接続することで3次元形状を構成する。

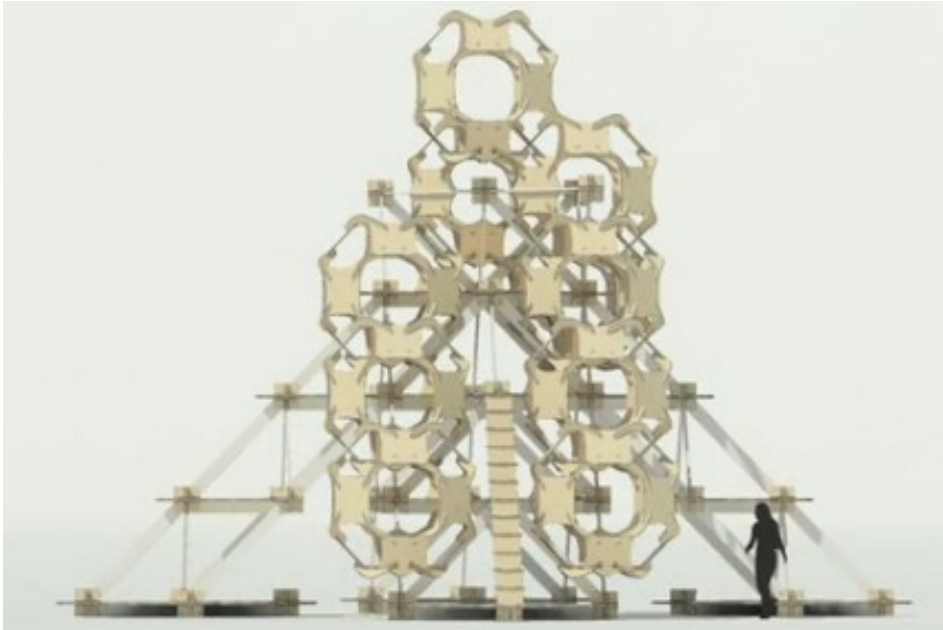
この手法を用いて、正多面体やその他対称性を持つ多面体を構成することができる。この棒を曲げを加えながら組み合わせ、対称性のある多面体を構成することで曲げによる反発力が釣り合い、力学的に安定した構造物を構成することができる。



ホルガー・ストロムによる IQlight という照明は菱形のモジュールを組み合わせることで形を作るランプシェードである。この工法でも各々のモジュールに曲げを加え、曲げによる反発力が構造としての安定性を高めている。ここで用いられている形は幾何学的には菱形多面体と呼ばれる多面体である。ここでつくられる菱形多面体の構成面は1種類の菱形であるが、それらの組み合わせによって多様な形の多面体を構成することができる。したがって、IQlightは1種類のモジュールから組み合わせ次第で様々な形のランプシェードを構成することができる。



Gregg Fleishman 氏は多面体の構造を木材の部材の組み合わせのみで構成し、それらの多面体を組み合わせることで仮設の構造物をつくっている。Gregg 氏の構造物は、切頂多面体から構成される。彼はこれらの切頂多面体を組み合わせ、連結させることで、単純でできるだけ少ないモジュールから仮設の構造物を構築している。



ここで挙げた 3 つの事例は、以下の特徴を持つ

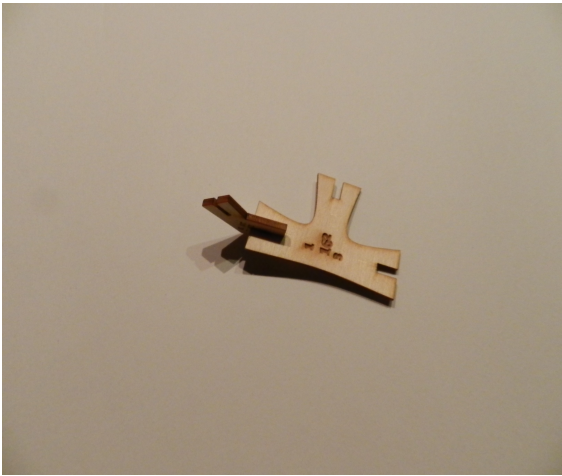
1. 単一もしくは限られた数種類のモジュールで構成されている。
2. どの構造物も多面体をなす。（つまり幾何学的に多面体と対応づけることができる）
3. 構造物の中のあるモジュールは”たわみ”を持っている。その”たわみ”の反発力をモジュール間の接合する力として利用し、構造を安定させている。

本研究では、digital fabrication の特徴を生かし、任意の凸多面体を Greg 氏の工法を用いて構成する。digital fabrication では、同じ形の部材の大量生産とほとんど同じ製造コストで、1 つずつ形状の異なる部材を大量生産することができる。本研究ではこの利点に注目し、様々な形状のモジュールを、目的とする凸多面体に応じて出力するシステムを開発した。さらにこのシステムを用いて、本章で挙げた 3 つの関連工法と同じようにモジュールに”たわみ”を与え、その ”たわみ”の度合いをコントロールすることができる。

Modularlizer について

・つくりかた

以下の図のように切り込みが入ったモジュールを組み合わせることで
立体を構成することができる。



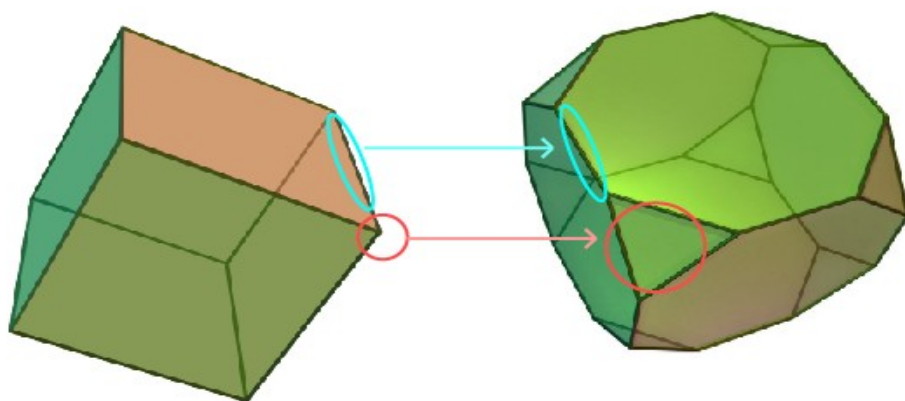
次に modularlizer のデータ入力から図面の出力・設計までのプロセスを解説する。

step1. 3D モデリングソフト等で、凸多面体を作成する。そして、多面体のすべての頂点とすべての面において、面を構成するすべての頂点の集合をリストとして modularlizer に与えます。

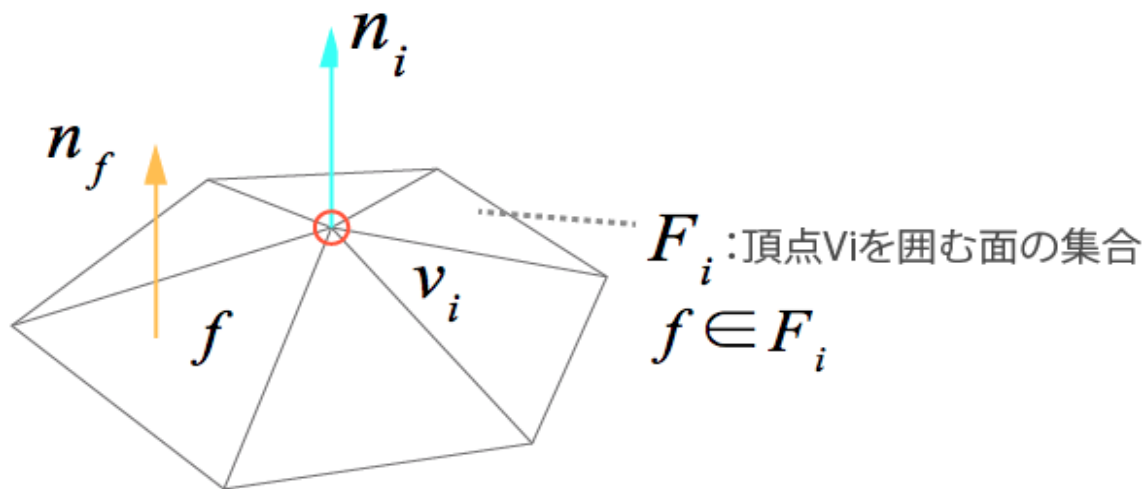
step2. 凸多面体のすべての頂点に対して、切頂面を定義する。

以下の図は、凸多面体とそれに対応する切頂多面体の対応関係を示している。

頂点は面に、辺は切頂面を結ぶ辺に対応している。



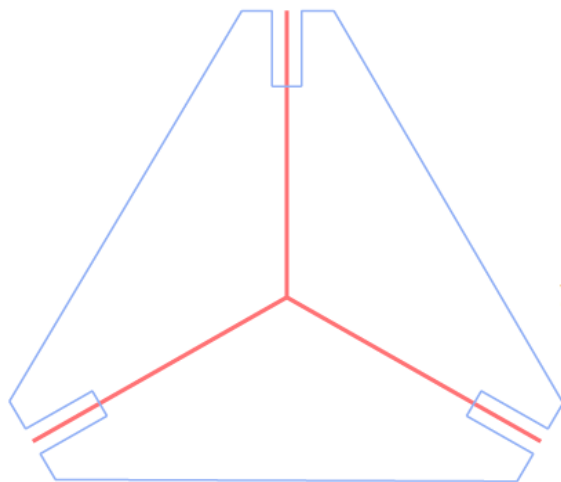
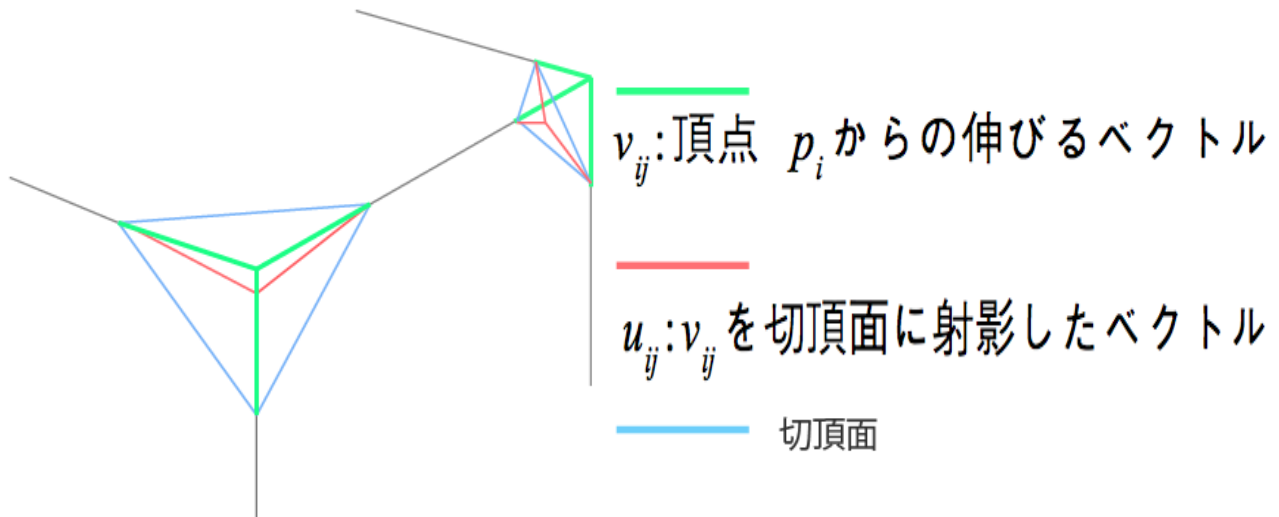
(step2の続き)次に、切頂面の定義を示す。切頂面は、頂点を囲む面の法線ベクトルの重み付き平均法線で定義される。ここでは、頂点を囲む各々の面の面積を重みとして、平均法線を求めている。



$$n_i = \frac{\sum_{f \in F_i} w_f n_f}{\left| \sum_{f \in F_i} w_f n_f \right|} = \frac{\sum_{f \in F_i} n_f \times n_f}{\left| \sum_{f \in F_i} n_f \times n_f \right|}$$

w_{F_i} は v_i を囲む三角形の面積
 を重みとする

Step3. “step2”で定義された法線をもとに、切頂面にあたるモジュールと、それらの面をつなぐ、辺に対応するモジュールを出力する。表記の簡易化のため、以下は切頂面に対応するモジュールを”Aモジュール”辺に対応するモジュールを”Bモジュール”と記す。さて、Aモジュールは、初期状態は切頂面の多角形として与えられる。（下の図2.0を参照）そして、Bモジュールとの接合部は、”step2”で定義した切頂面に、変形前の凸多面体の注目する頂点からのびる辺を射影して得られる。各々の頂点对して以下に示す定義で各切頂面に対してAモジュールを対応付けることができる。

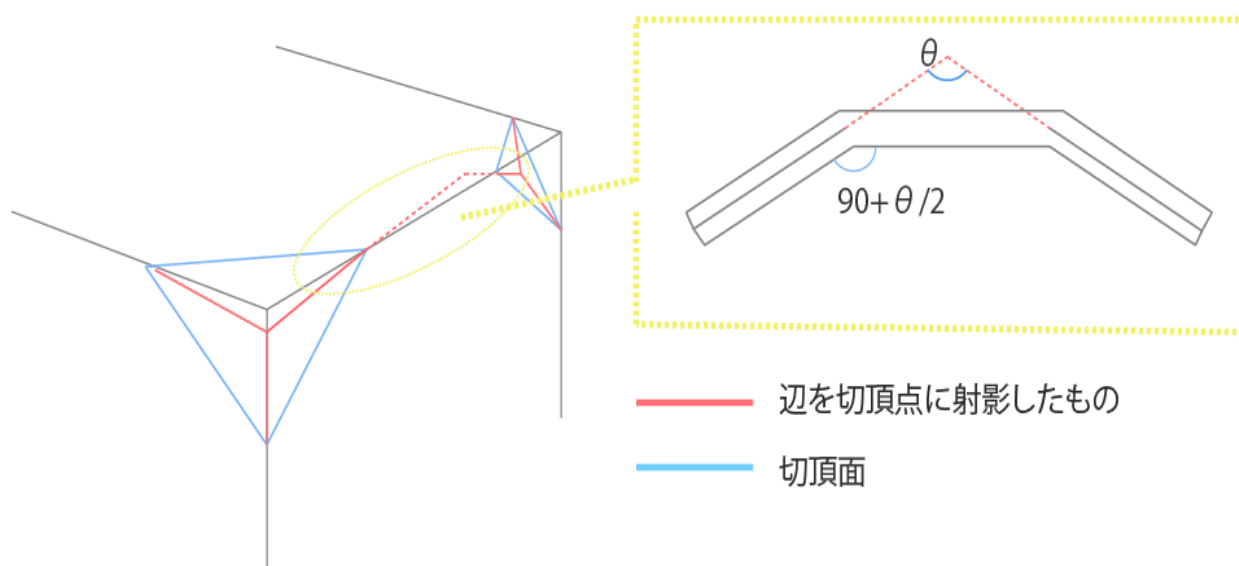


$A[\theta, v]$ は v を軸に θ だけ回転させる
行列とする

$$u_{ij} = v_{i,j} \cdot A\left[\frac{\pi}{2}, n_i\right] n_i \times v_{i,j}$$

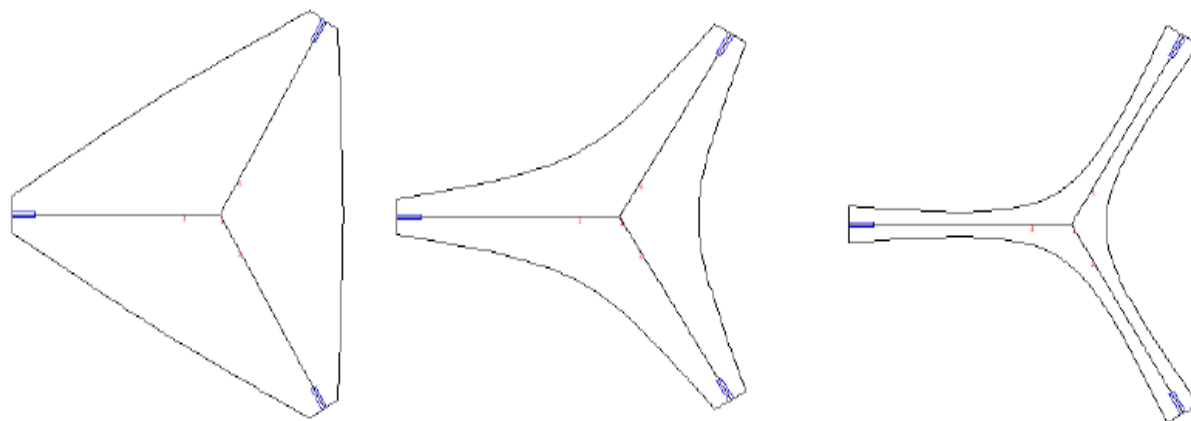
図2.0

(step3の続き)Bモジュールは、以下の図のように、切頂面からのびる辺同士のなす角度を求めることで定義できる。



(図3.1)

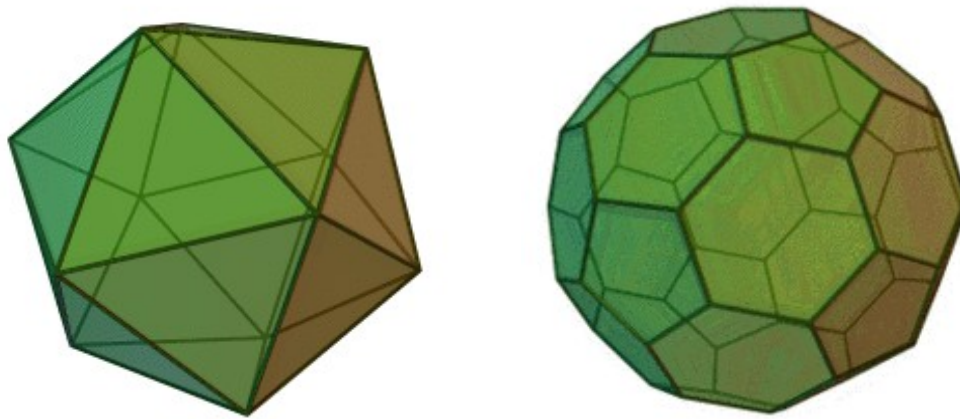
Step4. モジュールAのパラメータを操作し、形態を設計する。



Step5. “step3”の図3.1にあるように切頂面に射影されたベクトルを延長して、それらが交わるなす角 θ よりも意図的に大きな角度 θ' を設定することで、Aモジュールが曲げを加えてなければアセンブルできないようにする。このような方法でたわみを意図的に発生させる。

modularlizerによる製作例

下の写真は紹介する幾何学的には、4つとも正20面体の紙でできたモデルである。modularlizerは与えられた凸多面体を切頂多面体として構成するため、実物モデルは切頂正20面体と同じ形の構造物となる。ここでは、切頂面を膨らませることで、紙でボールを作ることを試みた。

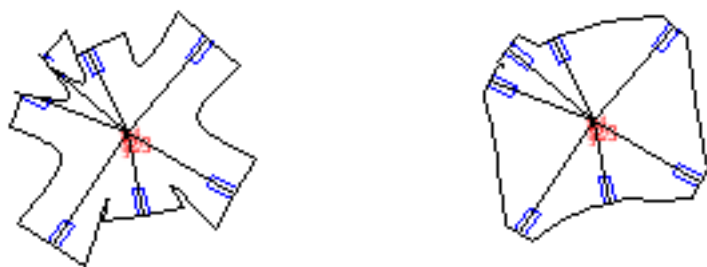


4つのモデルすべてに”たわみ”を加えボールとして扱うためにはどの程度のパラメータで”たわみ”が適切であるかを探索した。真ん中の2つのモデルは”たわみ”によってモジュール同士がしっかりと接合され紙であるがボールのようにして遊ぶことができた。

次にこの写真は実際に様々な凸多面体を3DCADやその他ソフトウェアで作成し、modularlizerによって実物モデルを構成した例である。



多面体の設計には、当時慶應義塾大学 政策・メディア研究科に在籍していた岩岡孝太郎氏と、現在、同大学環境情報学部3年生の升森敦士氏が行った。モジュールのアセンブリし、実物もでるを構成するプロセスは、同大学環境情報学部1年生の対馬尚氏が行った。彼女は予備知識なしでも、番号によるの組み立てのルールを教えることで、番号に従いモジュールを組み立て、凸多面体を構成することができた。modularlizer内でのモジュールの設計は筆者が行った。凸多面体の頂点数が多いばあい、以下の写真のようにモジュールの形状が崩れてしまう場合があった。



頂点に伸びる辺の数が多すぎるため、接合部が重複してしまい、このような形状のモジュールが出力されてしまう。この問題の解決策として以下の2つを行った。

1. 凸多面体の頂点数を減らし、接合部の重複を避けた。
2. モジュールのパラメータを操作することで、重複しない形態を探索し、形をキャリブレーションした。キャリブレーションした後のモジュールは上の右である。

頂点数意外にも、切頂面から伸びる辺のなす角があまりに少なすぎるということも、このような問題を発生させる要因となっていた。この問題を解決することは今後の課題である。次の章でこのような問題の解決策を述べる。

Modularlizerの問題点と展望

前章でも述べたように、modularlizerは与えられた凸多面体の形状データが複雑な場合、モジュールの形状が崩れ、実物モデルを構成することが困難となる。この場合、しばしば凸多面体データを作成し直す必要があり、多面体の設計から実物モデルの製作までに膨大な時間が必要と成る。この問題を解決するために凸多面体の形態設計ツール（CAD）とmodularlizerのシステムと連動させる。多面体の形態設計のプロセスと、図面の生成プロセスを統合することで、形態の設計と同時に実物モデルが製作可能かどうかを常に確かめつつ、形の設計を支援するシステムを開発する。

館智宏氏による”origamizer”は3Dモデルを変更するとリアルタイムに展開図がそれに応じて変化する。逆に展開図を変更した場合も、それに応じて3Dモデルが変化する。このように、3Dモデルと展開図の生成を同時に行うことで、設計者は現実的に折ることのできる展開図を3Dモデルの変更と展開図をキャリブレーションできる。本システムも、このようにモジュールのデータと、3Dデータをリアルタイムに連動し設計するシステムの開発を目指す。

考察

digital fabricationを前提としたCG上の幾何学形態からfabricationへという研究は、折り紙の場合は異なり、工法（作り方）が一意に定まるわけではない。つまり、折り紙の場合は、「一枚の紙から、紙を折るという行為のみでどれほど多様な形態を表現できるか」という厳格なルールのもと、computationによる形態探索システムを構築すればよいが、digital fabricationの場合は工法（ルール）が無数に存在するため、工法（つくりかた）も設計する必要がある。例えば本研究の場合 「一枚の平板から部材を切り出し、それらの組み合わせでどれほど多様な造形を作ることができるか」といった探求行うものであるが、その際の造形手法（ルール）は無数に存在する。したがって、設計支援システムを構築する以前の工法を設計することが非常に重要であると筆者は考える。

例えば、「任意の非凸多面体を含む多面体を、モジュールの組み合わせで構成したい」という要求があった場合、多様な多面体を構成するのに最も適した工法を考えなければ、どれほど洗練された設計支援システムを開発してもその目的を達成することはできない。どのような工法に対しても、その工法でどのような形態が実現可能かを明らかにし、設計支援システムを構築することは有益であるが、最も大事なことはある目的に最も適した工法を設定することである。

Integration of Geometry, Material Mechanics, and Construction

本論文では、ベジェ曲線・凸多角形といった幾何学的なデータから、実物のモデルをつくる手法を紹介した。ここには大きく分けて3種類の制約がある。1つは幾何学的制約、例えば曲線の場合は曲率、多面体の場合は、頂点数や辺同士のなす角である。もう1つは材料力学的制約である。本研究でも、曲げの加工を行う際、本来ならば材料力学的な解析・考察が必要である。この制約を考慮しなければ可能な形の上限を設定することができない。3つ目の制約は、部材の組み合わせによる制約である。部品を組み合わせる際の”組み合わせ方法”によって、生まれる制約である。具体的には本論文で紹介した、ジュールの組み合わせ方は、モジュールを90度回転させ組み合わせる手法などから生まれる制約である。3つ目の制約を言い換えると「”作り方”によって生まれる制約」と言える。これら3つの制約条件は相互に影響を与え合い、もの作りにおける制約は非常に複合的なものとなる。

本研究では、”作り方における制約”(construction boundary)と幾何学的制約(geometrical boundary)を解いた上で設計システムを構築した。材料力学的制約(material mechanical boundary)は設計者の経験的な知識にゆだねられている。しかし、これら3つの制約はすべてが統合され解かれた上で、設計システムが作られるべきである。より具体的に述べれば、ベジェ曲線の曲率に応じてカットパターンの自動生成をするためには、曲率の計算（幾何学的制約）とパターンに応じた弾性の変化の解析（材料力学的制約）最後に、図面の生成（作り方における制約）をすべて解かなければならない。この3つの制約条件をとくことで、初めてコンピュータ上の可能な限り多様な曲線から実物モデルを構成することができる。2つ目の研究の凸多面体の実物モデルを構成する研究も同様である。今後はこの3つの制約を統合的に解き、設計システムとして完成したものを目指す。

関連研究

[1]梅谷信行、高山健志、三谷純、五十嵐健夫

実時間固有値解析による対話的な鉄琴のデザイン、**WISS 2010**

<http://www.designinterface.jp/projects/metallophone/metallophone.pdf>

[2]Design and Fabrication of Materials with Desired Deformation Behavior

B. Bickel, M. Bächer, M. Otaduy, H. R. Lee, H. Pfister, M. Gross, W. Matusik

<http://graphics.ethz.ch/publications/papers/paperBic10.php>

[3]<http://ja.wikipedia.org/wiki/ベジエ曲線>

[4]Jun mitani and Hiromasa Suzuki: "Making Papercraft Toys from Meshes using Strip-based Approximate Unfolding", ACM Transactions on Graphics, Vol. 23, No. 3, pp.259-263, 2004.

http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/dl/mitani_2004_siggraph_papercraft.pdf

[5]Tomohiro Tachi, "Origamizing Polyhedral Surfaces," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 16(2), pp. 298-311, 2010.

http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/OrigamizingPolyhedralSurfaces_tachi_IEEETVCG.pdf

謝辞

私は、多くの人々に支援を受け本研究を行うことができた。担当教員である田中浩也先生にはdigital fabricationやcomputational designの最新の研究を教えていただき、常に情熱をもって研究に取り組むことができた。私の研究に対してもサジェストをいただき、その度に勇気をいただいた。ここに感謝の気持ちを込める。ありがとうございました。

私が、研究会でお世話になっている向井国昭先生は、常に私の研究と数学を絡めてサジェストをしていただいた。数学に対する情熱を常に感じる事ができた。向井先生の数学に対する態度をみて、自分の研究生活における姿勢の参考にした。ここで心より感謝したい。そして、本研究の製作を行うこととなったfablab kamakuraという施設を運営している渡辺ゆうかさんには外部のデザイナー等の社会人との刺激的な出会いを支援していただいた。製作環境もこれ以上ないほど贅沢なものを使うことができた。ここに感謝を込める。

研究室の4年生の廣瀬悠一、金崎健治、唐木ひとみにはともに研究活動を密に行った。ともに議論をすることで、自分の研究を深めることができた。ここに感謝する。

本研究内のプロジェクトで京都で展示を行った。その際に共同で製作に参加した升森敦士には非常にハードなプロジェクトをともに協力して行った。ここに感謝をする。

そして、田中研究室のメンバー、OBである岩岡孝太郎氏と平本智樹氏にも研究の相談に乗っていただいたことを深く感謝する。

最後に、私の家族、友人に精神的に支えられた上で研究活動を行うことができた。ここに感謝をする。