

## 任意の弾性特性を設計・製作するための情報環境の構築

### 概要

本研究では対象物にパターン形状を加工することで対象物が本来持っている変形・弾性特性を変化させ、それらの物理特性を計算機を用いて明示的に設計可能にするための情報技術を提案する。近年、三次元プリンタやレーザーカッターなどのデジタル制御による工作機械を用いて、素材に自由な形状パターンを加工することが容易になった。これらの工作技術を用いて、切削または樹脂を三次元に積層することで形状パターンを加工し対象物の変形・弾性特性を変化させる加工法が数多く試作されている。以下、この加工法を形状パターンによる弾性加工と呼び、この加工法が施された素材をパターン弾性体と呼ぶ。本研究ではパターン弾性体における、パターン形状とそれによって生まれる物理特性の関係をモデル化し変形形状および弾性特性を計算機を用いて明示的にコントロールし、設計・製作するための情報技術の構築を目指す。

本論文では1章は研究の背景を述べ、2章では具体的なアプリケーションの提案を行う。ここではパターンによる弾性加工の変形特性に注目し、“壊れない”変形形状を設計・製作するためのシステムを開発した。3章ではパターン弾性体の形状パターンとそれによって生まれる弾性特性の関係に着目し、その解析モデルを有限要素法プログラムを開発することで提案する。ここではパターン弾性体の弾性特性を設計・製作するための基礎技術の検討を行った。この論文要旨は修士論文の同じ章立て構造であり、それを概略した内容となっている。

## 1.背景

パターンによる弾性加工とは図1,2にあるような形状パターンを対象物を切削または三次元に積層することで加工し、対象物の弾性特性を変化させる加工法である。この加工法は形状パターンによって対象物内に局所的に変形する部位を持たせ、その変形が集積することで対象物全体の変形を構成するものである。この加工法はこれまでも日常的に利用されており、具体的には図3にあるようなトタンと呼ばれるある方向への曲げ剛性を保ちつつ素材を薄肉軽量化する加工法などがある。また、近年急速に普及しつつある三次元プリンタやCNC(Computerized Numerically Controlled)切削機(これらの工作技術をここではデジタルファブ리케이션技術と呼ぶ)を用いることで加工コストが下がり自由な形状パターンを容易に加工することができるようになった。これに伴い形状パターンによる弾性加工の様々な応用が世界各地で試作されている。近年ではこのデジタルファブ리케이션技術の発展に伴いこれまでとは異なるパターン弾性体の利用法が注目されている。ここではこれまでのように素材の剛性を高める加工ではなく、“しなやかさ”や稼働部を設計・製作するために“あえて”素材の剛性を損なわせる加工が行われている。具体的にはスイスのデザイン会社による変形を加味したツールや(図4)、Apple社によって出願された特許でもあるヒンジなどの部品を用いない稼働部の設計手法が挙げられる(図5)。これらの“剛性としての弾性”ではなく“柔らかさとしての弾性”の加工は数多く試作されてはいるが、加工法そのもののメカニクスは明らかにされておらず、現在では試行錯誤によって必要な挙動を生み出すパターンを加工する必要があると、目指す挙動を生み出すパターンの発見は困難である。また、そのため加工法の潜在能力も開拓されているとは言えない。そこで本研究では、パターン弾性体を改めて明確に定義し、その変形特性および弾性特性を明示的にパターンによって設計可能にすることを旨とする。これによって上述した加工法としての課題を解決すると共に、パターンによる弾性加工の可能性を開拓する。2章ではパターン弾性体を用いた変形形状を設計・製作するための具体的なアプリケーションを提案する。3章はそこで得られた問題意識をもとにパターン弾性体の弾性特性を設計・製作するための基礎技術としてパターン弾性体の解析モデルを有限要素法プログラムを開発することで提案する。



図1：パターン弾性体の一例



図2：三次元プリントされたパターン弾性体

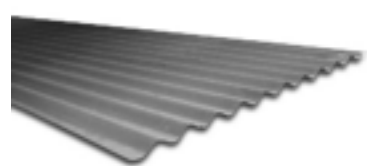


図3：トタン  
(corrugated galvanised iron)



図4：変形を含むツール

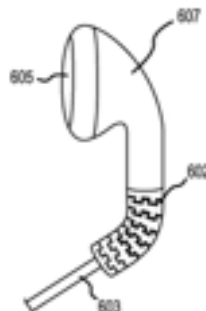


図5：パターンによるイヤホンの稼働部

## 2.パターン弾性体による変形特性の設計・製作手法

### 2.1 概要

ここではDuktaと呼ばれるパターンによる弾性加工を用いた変形形状の設計・製作システムを提案する。Duktaとは平板にCNC切削機によって切り込みパターンを施すことで対象物の変形特性（あるいは弾性特性）を変化させる加工法である。ここではDuktaの3つ存在する変形モード(図12~14)のうち2つを用いた”壊れない”変形形状を設計・製作するためのシステムを提案する。システムを用いた試作として、平板を用いた曲げ形状を持つ椅子を製作した。通常、曲げ形状の加工は型を用いて特定の形状を大量に生産するものであるが、ここでは形状パターンの切削と部材の組み合わせのみで様々な曲げ形状をオンデマンドで製造することができる。ここでの貢献は次2つである。

- 1.Duktaを用いた壊れない変形形状の設計手法の提案
- 2.型を用いない自由な曲げ形状の製造手法の提案

### 2.2 設計システム

設計システムは設計者がDuktaの最適なパターンとその変形限界パラメータを与えると壊れない形状を内部的に2次元平面上の実行可能領域として定義する。設計者は曲げを設計し、システムがその形状が壊れない形状（以下、堅牢な形状と呼ぶ）か壊れる形状かどうかを実行可能領域を用いて判定する。より具体的には、Duktaによる曲げ形状は接線連続の円弧曲線であり(図7)、堅牢な形状を実行可能領域として円弧の内角をx軸、半径をy軸とする2次元平面上の部分領域として定義する。設計者はパラメトリック曲線を設計しシステムはその曲線を設計と同時に円弧曲線に離散化する。次にシステムはその円弧曲線で得られた円弧の集合が実行可能領域内に存在するかどうかを判定する(図9)。これによって得られた円弧曲線のすべての部位において堅牢か否かを判定することができる。堅牢な形状が得られた場合、システムはその曲げを実現するためのパターンを自動生成する。最終的にそのパターンを加工用のデータとして出力し、工作機械を用いて平板を加工することで、通常の平板から求める変形特性を持つ素材に加工することができる。

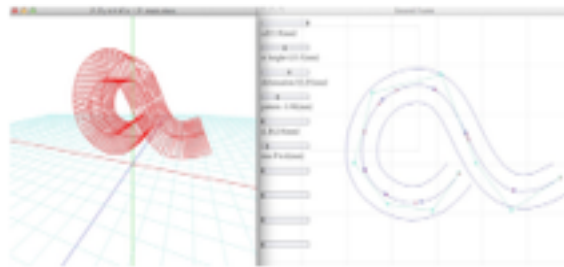


図7：パターンと円弧曲線の対応      図8：システムの設計インターフェース

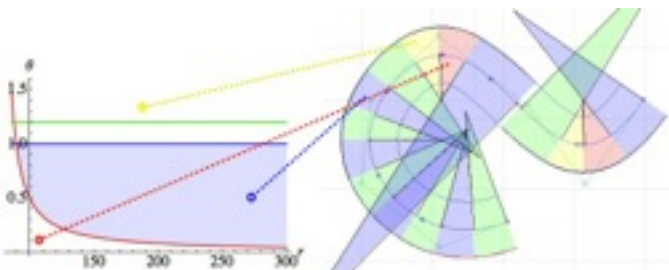


図9：  
実行可能領域を用いた堅牢な形状の判定

## 2.3 ファブリケーション

システムを用いて曲げ形状を持つ椅子を製作した。通常、平板の曲げ加工は型を用いてその形状を大量に生産するものであったが、ここでは型を用いない自由な形状を、パターンの切削加工と、加工が施された部材の組み合わせのみで構成することができる。これによって、オンデマンドで多様な曲げ形状を比較的 low コストで製造することができる。



図10:製作過程。切削加工された合板を組み合わせる様子



図11:最終形状

## 2.4 評価と展望

本システムはDuktaによる加工を用いて自由な変形形状を設計・製作するものである。ここでは、Duktaの2つの変形を用いて自由な変形形状を破壊を意識することなく設計することができる。一方このシステムではDuktaがもつ弾性特性を加味しておらず、設計の初期段階でシステムに最適なパターンを入力する必要がある。最適パターンとは、パターンを対象物に切削することで材が線形弾性変形内である程度変形するようなパターンである。設計者は設計の前段階で、実際に複数種類のパターンを製作し実験によって対象物にある程度の変形をもたらすパターンを発見する必要がある。次の章では、パターン弾性体のパターンとそれによる弾性特性の関係をモデル化し、必要な弾性特性を生み出す最適パターンをシステムに半自動で生成させるための基礎技術について提案・検討する。

### 3.パターン弾性体の弾性特性の解析

#### 3.1 概要

パターンによる弾性加工はパターンによって対象物が本来持っている弾性特性を変化させることができる。ここでは、パターンとそれによって生まれる弾性特性の関係をモデル化し、計算機を用いてパターンによる弾性加工を利用した弾性特性の明示的な設計を実現するための情報技術について提案する。具体的には、素材の弾性率（ここではヤング率のみ）とパターンを与えた際に、対象物がどのような弾性体を構成するかをシミュレートするための解析モデルを提案する。ここでは有限要素法プログラムを開発することで解析モデルの提案を行った。

#### 3.2 手法

パターン弾性体は圧縮の起こらない一次元弾性棒と見なすことができる。つまり単純な引っぱりと曲げのみで構成される弾性棒である。また、パターン弾性体の変形は3つの大域変形モードとそれに対応する局所変形から構成され（図11）。局所変形は境界条件の異なる梁と見なすことができる。この異なる梁の変形によって、3つの大域変形が構成される。

ここでは単純化のためのパターン弾性体の挙動を2次元に限定して解析し有限要素法プログラムを開発した。ここでは構成則の客観性の原理をもつSt.Venant.Kirchhoff Materialを用いて、一次元の線形弾性棒をシミュレートする。その際にパターン弾性体の変形特性を加味した弾性率、メッシュ形状を持つ一次元弾性体をシミュレートする。その後、パターン弾性体の幾何的制約（圧縮の起こらない部位が存在するという制約）を加味したメッシュ形状に弾性棒の形状を変化させる。（具体的な手法に関しては修士論文を参照されたい）



図12 : Clamped-Guided Beam

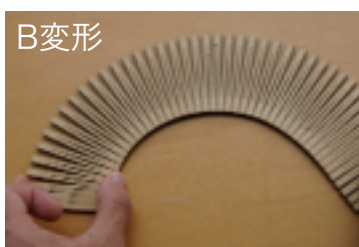


図13 : Cantilever

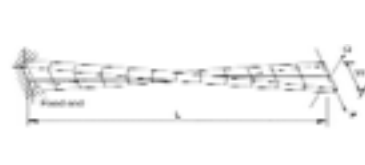
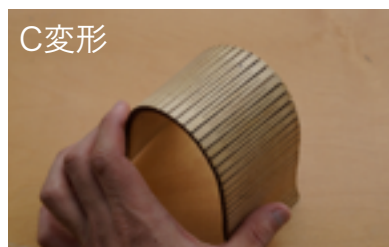


図14 : Twisted Beam

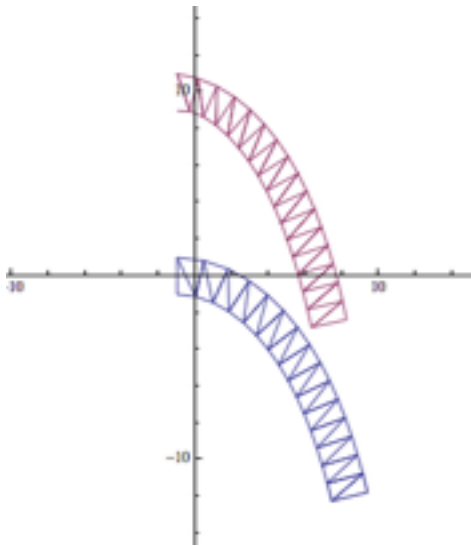


図13：シミュレーション結果  
上の赤色は通常の弾性体、下の青色  
はパターン弾性体

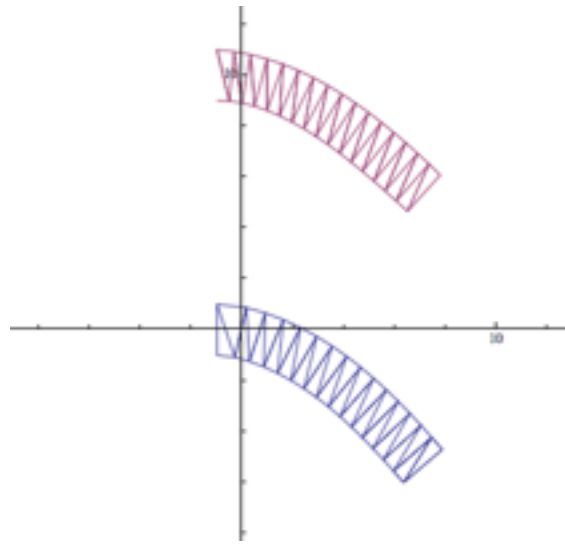


図14：13とは異なるパターンのシミュレーション結果  
上の赤色は通常の弾性体、下の青色はパターン弾性体



図15：パターン弾性体の変形



図16：15とは異なるパターンのパターン弾性体の変形

### 3.3 シミュレーション結果

具体的に3.2で述べたモデルを用いて有限要素法プログラムを実装した。図12,13は異なるパターンのパターン弾性体のシミュレーション結果である。ここでは時間の関係上、正確な実験を行うに至らなかったが、今後はシミュレーション結果とパターン弾性体の実測結果の比較実験を行いモデルの健全性を検証する。