

マス・フォア・インダストリ研究 No.22

# 数理的生成手法による CGとデジタル ファブリケーション

編集 巴山 竜来  
中丸 啓  
大垣 真二

Institute of Mathematics for Industry  
Kyushu University





## About the Mathematics for Industry Research

The Mathematics for Industry Research was founded on the occasion of the certification of the Institute of Mathematics for Industry (IMI), established in April 2011, as a MEXT Joint Usage/Research Center – the Joint Research Center for Advanced and Fundamental Mathematics for Industry – by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) in April 2013. This series publishes mainly proceedings of workshops and conferences on Mathematics for Industry (MfI). Each volume includes surveys and reviews of MfI from new viewpoints as well as up-to-date research studies to support the development of MfI.

October 2018

Osamu Saeki

Director

Institute of Mathematics for Industry

## **Computer Graphics and Digital Fabrication in Mathematical Aspects**

Mathematics for Industry Research No.22, Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University

ISSN 2188-286X

Editors: Tatsuki Hayama, Satoshi Nakamaru, Shinji Ogaki

Date of issue: 15 March 2021

Publisher:

Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University

Motooka 744, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, JAPAN

Tel +81-(0)92-802-4402, Fax +81-(0)92-802-4405

URL <https://www.imi.kyushu-u.ac.jp/>

Printed by

Kijima Printing, Inc.

Shirogane 2-9-6, Chuo-ku, Fukuoka, 810-0012, Japan

TEL +81-(0)92-531-7102 FAX +81-(0)92-524-4411



# 数理的生成手法による CG と デジタルファブリケーション

編集 : 巴山 竜来  
中丸 啓  
大垣 真二



はじめに

本研究集会「数理的生成手法による CG とデジタルファブリケーション」は、数学のコンピュータグラフィックス(CG)やデジタルファブリケーションへの応用を目指し、数学・情報科学に関する研究者とソフトウェア開発に携わる技術者、およびそれを製品設計や芸術表現に活用するデザイナーやアーティストとの学際的交流を目的として企画された研究集会である。当初は幅広いテーマでの研究集会を計画していたが、コロナ禍での開催による制約から、研究対象の的を絞り、規模を縮小してオンライン上で開催された。

本研究集会のテーマは織物である。とくに組織、素材、CG 表現の3つの観点から研究開発に携わる古舘健氏、堂園翔矢氏、笥康明氏、中丸啓氏、大垣真二氏を講演者として招待した。当組織委員代表者の巴山竜来を含む6人の講演者のうち、大垣氏を除く5人は京都の西陣織企業である株式会社細尾の研究開発事業に関わっており、この事業に関する話題が講演では触れられた。とくに古舘氏と堂園氏と巴山が織物組織に関するプロジェクトに関わっており、笥氏と中丸氏が織物素材に関するプロジェクトに関わっている。CG レンダラ開発者である大垣氏は、近年の布の CG 表現に関するサーベイ講演を行った。

株式会社細尾との研究開発事業に関する経緯を簡単に述べておくと、山口情報芸術センターと株式会社細尾との共同研究開発プロジェクトに、古舘氏と慶應義塾大学笥研究室(当時)が参加していたことから研究開発事業がはじまっている。この成果は2017年度に展示「布のデミウルゴスー人類にとって布とは何か？」(山口情報芸術センター)で公開された。これを発展する形で古舘氏によるプロジェクト「Quasicrystal—ジェネラティブな手法を用いた準結晶的な織物表現の探求」が2019年度メディア芸術クリエイター育成支援事業として採択された。このプロジェクトに堂園氏、巴山、さらに平川紀道氏が加わって共同開発が行われ、その成果が2020年10月から展示「Quasicrystal—コードによる織物の探求」(HOSOO GALLERY)で公開された。一方、笥氏と中丸氏は素材からのアプローチによる織物の研究開発を ZOZO テクノロジーズ、東京大学笥研究室、株式会社細尾との共同研究として進め、この成果は2021年3月から展示「Ambient Weaving — 環境と織物」(HOSOO GALLERY)で公開される。

本研究集会ではこの研究開発で得た知見を共有し、今後の研究開発への応用へ向けてのディスカッションを行った。織物自体の歴史は古いが、最先端のテクノロジーが入り込む(ハックする)余地が十分に残されており、その数理構造や素材、意匠、機能性、可視化など多様な観点からの分野横断的研究、および産業への技術応用が可能である。さらなる研究推進を目指したい。

組織委員代表 巴山竜来  
2021年2月26日

# 目 次

織物組織の数理と実装 (Mathematics of Weaving and Implementation)	
巴山竜来 (専修大学) Tatsuki Hayama (Senshu University) . . . . .	1
多孔質柔軟素材を用いたフィジカルインタラクション (Physical Interaction Using Porous Soft Materials)	
中丸 啓 (東京大学) Satoshi Nakamaru (University of Tokyo) . . . . .	23
布の可視化技術 (Technique for Visualizing Clothes)	
大垣真二 Shinji Ogaki . . . . .	39

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所共同利用・研究集会  
数理的生成手法による CG とデジタルファブ리케이션

IMI Workshop of the Joint Research Projects in Kyushu University  
**Computer Graphics and Digital Fabrication in Mathematical Aspects**

日時：2021 年 1 月 29 日（金）10:00–16:00

場所：Zoom によるオンライン開催

Date: January 29 (Fri), 2021 10am to 4pm in Japan

Place: Online via Zoom

<https://sites.google.com/view/weaving2020>

10:00–10:10 ご挨拶 Opening Remarks

10:10–11:00 巴山竜来 Tatsuki Hayama (専修大学 Senshu University)

織物組織の数理と実装 Mathematics of Weaving and Implementation

11:10–11:40 古舘健 Ken Furudate

Quasicrystal / コードオリエンテッドな織物の可能性 The Possibilities of Code-Oriented Textile

11:40–13:30 休憩 Lunch Break

13:30–14:00 堂園翔矢 Shoya Dozono (Qosmo)

コンピューテーショナルデザインと織物 Computational Design and Textile

14:10–15:00 笥康明 Yasuaki Kakehi (東京大学 University of Tokyo)

中丸啓 Satoshi Nakamaru (ZOZO Research)

素材駆動フィジカルインタフェース Material-Driven Physical Interfaces

15:10–16:00 大垣真二 Shinji Ogaki

布の可視化技術 Technique for Visualizing Clothes

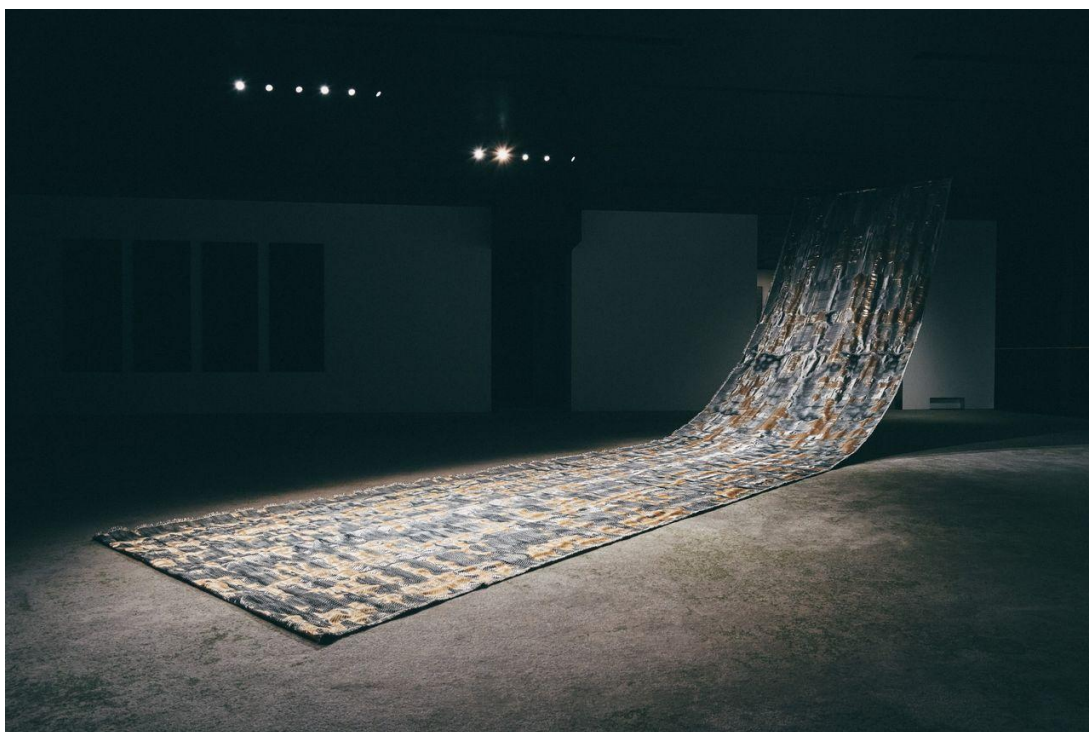
組織委員 Organizers: 石井豊 Yutaka Ishii (九州大学 Kyushu University) / 大垣真二 Shinji Ogaki / 鍛冶  
静雄 Shizuo Kaji (九州大学 Kyushu University) / 巴山竜来 Tatsuki Hayama (専修大学 Senshu University)



# 織物組織の数理と実装

巴山竜来 Tatsuki Hayama (専修大学 Senshu University)

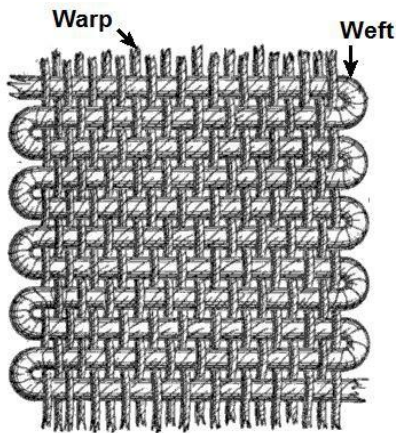
In this presentation, we report some results obtained through a R&D project with HOSOO, the traditional weaving company in Kyoto. We investigate weaving structure in a mathematical viewpoint and implement it in a computer program. Collaborating with machine engineers, we create a new kind of textile works.



京都の西陣織企業(株)細尾との研究開発事業で作成したテキスタイル作品"Nocturne".  
グループ展"[Quasicrystal](#)" (HOSOO Gallery 2020年10月24日～2021年3月10日)での展示風景。

## 布の種類

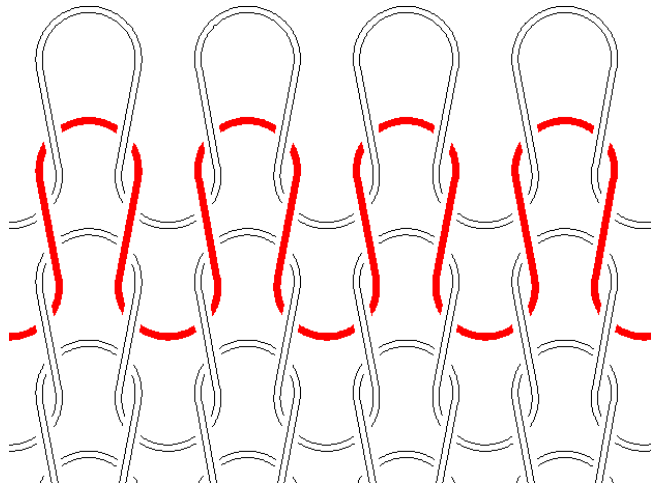
- 織物：2方向の直角に交わる糸が交差してできている
  - 例：ワイシャツ，ジーンズ
- 編み物：1本の糸を絡めてできたもの
  - 例：ニット，靴下



織物の構造

Alfred Barlow, Ryj, PKM

([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Warp\\_and\\_weft\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Warp_and_weft_2.jpg)),  
"Warp and weft 2",  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>



編み物の構造

anonymous

(<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Knit-schematic.png>), "Knit-schematic",  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

## 織物の魅力

### 原始的なデジタルファブリケーション

- バイナリデータがそのまま「もの」になる
- コンピューテーション(とくに並列計算)との相性の良さ
- データ生成の数理構造が布の特性に直結する

### 素材のおもしろさ

- 積層造形との違い

- 層の順序関係が切り替わる
- 

## チャレンジ

リピートなしの150cm幅ジャカード織機を使ったコンピュテーショナルな組織生成による西陣織

### 「新しい」織物をつくる

- 布を組織からつくる
  - 通常のジャカード織り発注では，出稿画像にあらかじめ決められた組織を当てはめて織る
- 人間の計算能力を超えた複雑さを持つ組織

### 「美しい」織物をつくる

- 織物には長い伝統の中で美的な価値観や文脈が醸成されてきた
- 「新しい」と「美しい」は共存するか？

### 「織れる」織物をつくる

- 織物として成り立つための制約
  - ほつれてはいけない
  - 長尺が織れる必要がある
    - 通常は安定パターンの組織を反復させる
    - 組織の粗密をうまく整えなければならない

結晶構造の話に似ている

---

## 今回のアプローチ

### 数学的な組織生成手法

- 行列・テンソルの演算
- 波の重ね合わせで模様をつくる

### コンピュータでの実装

- 並列計算

- 機械学習フレームワーク

## 素材のおもしろさを引き出す

- 多重織りによる「からぶくれ」
    - 綿(白・黒), 箔(金・銀), 銀糸の6層構造の三重織り
- 

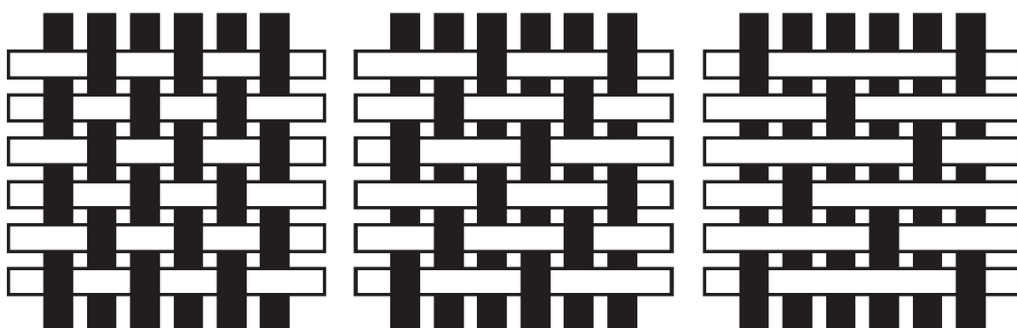
## 織物組織

### 織物の構造

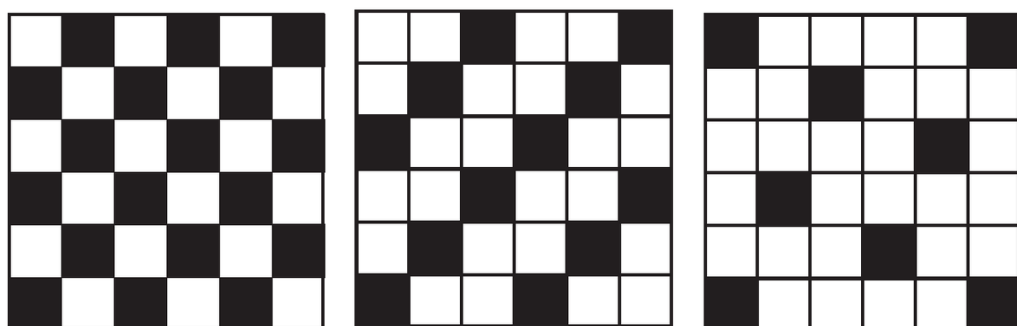
- タテ糸とヨコ糸の交差でできている
  - 交差の仕方を組織と呼ぶ
  - 織物組織は「浮き」「沈み」の2次元二値データ配列
    - 組織を行列として捉えることができる
    - 織り組織の行列要素数 = タテ糸の本数 × ヨコ糸の本数
- 

### 三原組織

構造図



組織図

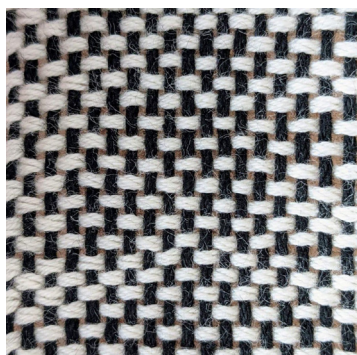


平織

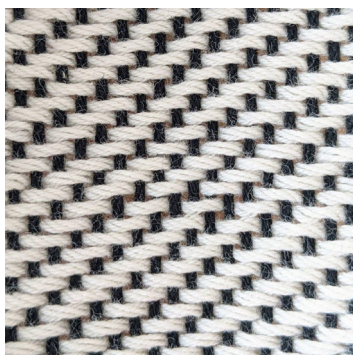
斜文織

朱子織

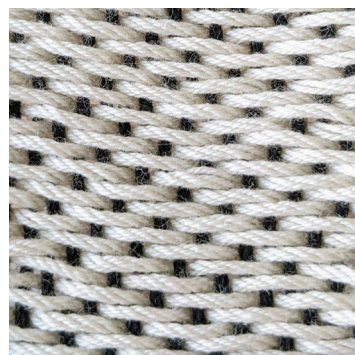
“Quasicrystal”展ハンドアウトより引用  
中央は3枚綾織り，右は5枚3飛び朱子織



平織



3枚綾織(斜文織)



5枚3飛び朱子織

## 平織

- 例：ワイシャツ，ハンカチ

$$x_{i,j} = i - j \bmod 2$$

```
x[i, j] = (i - j) % 2 == 0
```

## 綾織

- 例：チェックのシャツ，ジーンズ

$$\frac{m}{n} \curvearrowright \text{綾織り} x_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \equiv j - a \bmod m+n \text{ を満たす } 0 \leq a < m \text{ が存在する場合}) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

m, n #綾の太さ, 飛び数

```
x[i, j] = (i - j) % (m + n) < m
```

## 朱子織

- 例：光沢のあるサテン生地

$$m\text{枚}n\text{飛び朱子織} : x_{ij} = \begin{cases} 1 & (in \equiv j \bmod m \text{ の場合}) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

m, n #枚数, 飛び数

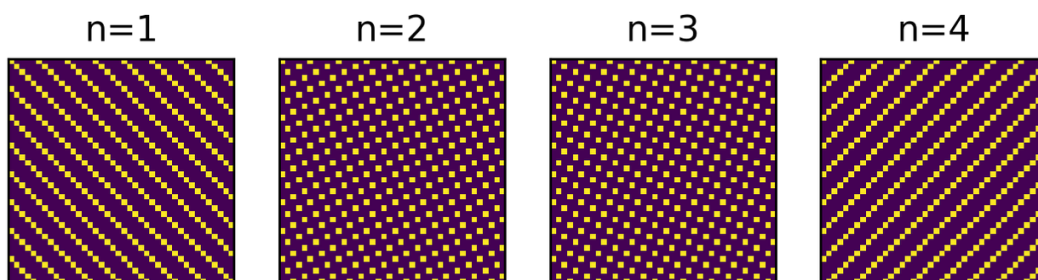
```
x[i, j] = (i * n - j) % m == 0
```

- (太さを無視すれば)三原組織はすべて朱子織だと見なせる
- すべてのタテ糸にヨコ糸が絡むためには，枚数と飛び数は互いに素でなければならない(ユークリッド互除法)
- パラメータの取り方で組織の密度や綾目が変わる

## 格子構造

- 朱子織は整数格子
  - $Z(m, 0) + Z(n, 1)$
- 最適化
  - 最短ベクトル  
格子点のうち，原点に最も近いベクトルのこと．一般に最短ベクトルを見つけるのは難しい(Shortest Vector Problem, SVP)
    - 最短ベクトルの長さ＝組織の密度
  - 基底の簡約  
格子の基底をなるべく短く，直交に近くとること．いくつかの計算アルゴリズムがある．
    - Lagrange-Gauss algorithm

- 基底ベクトルの長さの比，角＝綾目の具合
- 格子の構造が布の質感をつくる

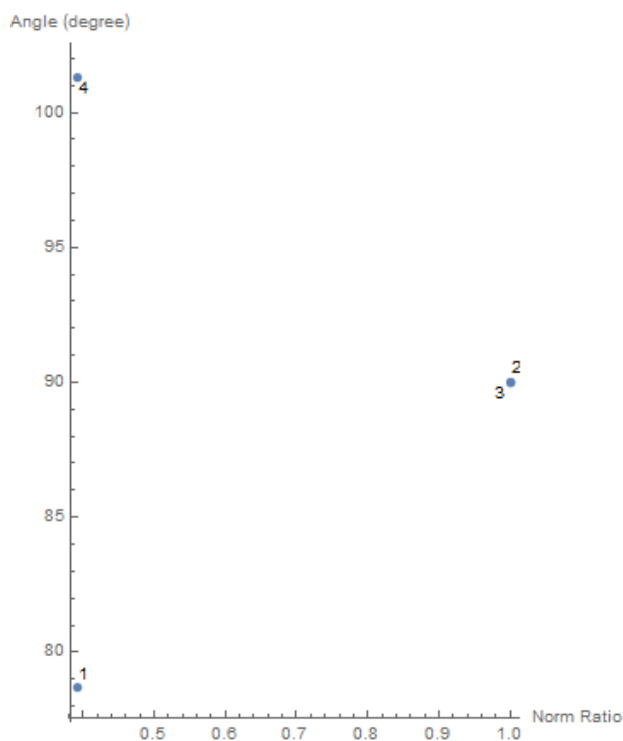


飛び数 $n$ による5枚朱子の違い

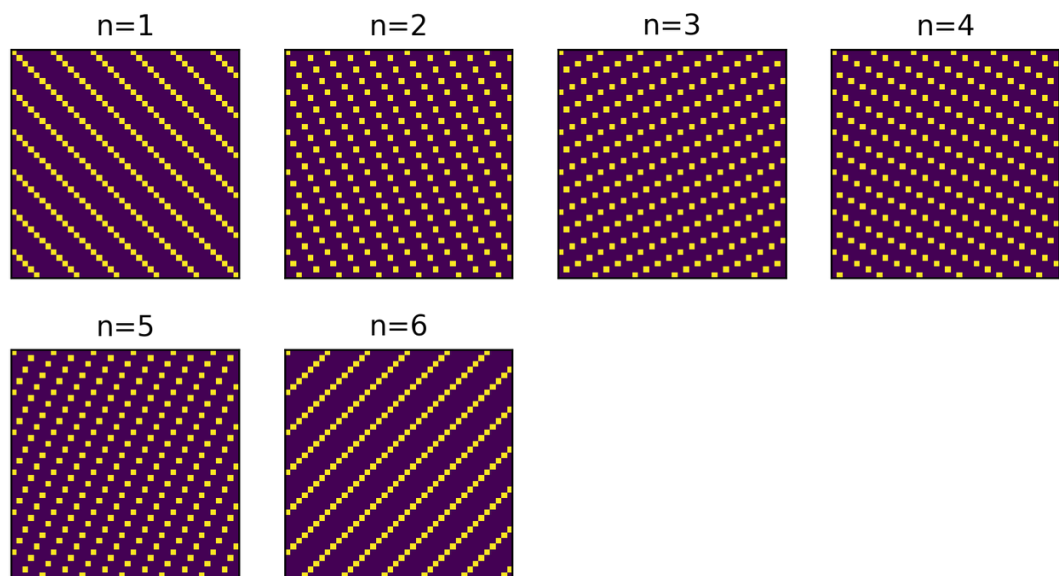
$$\left\{ \begin{array}{l} \{ (1, 1), (3, -2) \} \\ \{ (2, 1), (1, -2) \} \\ \{ (-2, 1), (1, 2) \} \\ \{ (-1, 1), (3, 2) \} \end{array} \right\}$$

1
2
3
4

5枚朱子の簡約基底



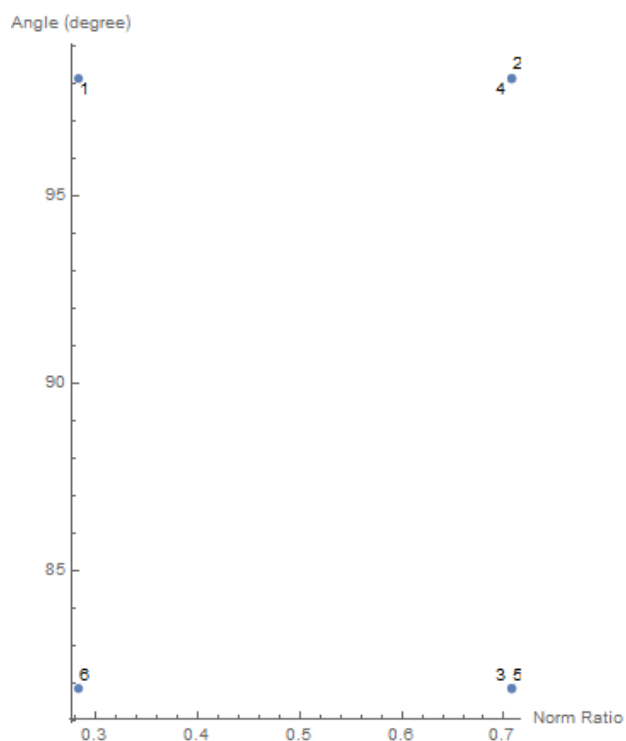
5枚朱子の簡約基底の長さの比と角



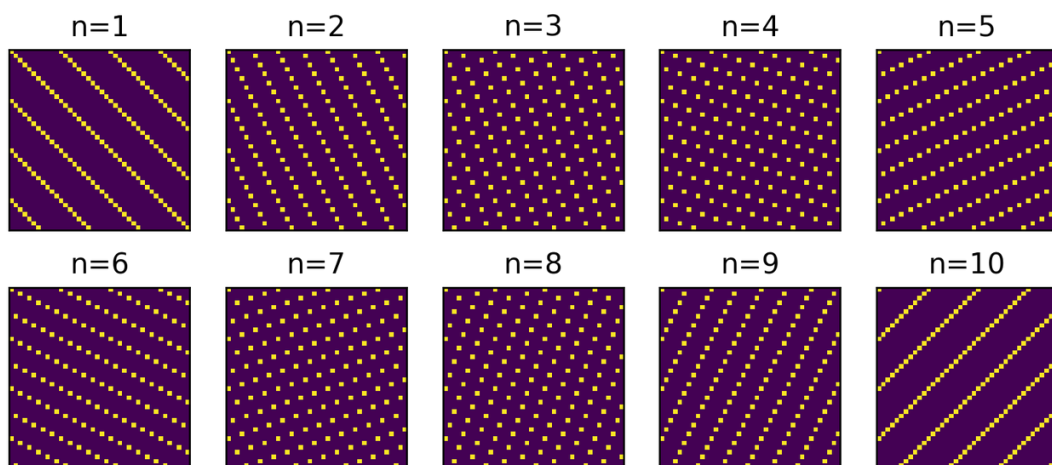
飛び数 $n$ による7枚朱子の違い

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} \{ \{1, 1\}, \{3, -4\} \} & , & \{ \{2, 1\}, \{1, -3\} \} & , & \{ \{1, -2\}, \{3, 1\} \} & , & \{ \{1, 2\}, \{-3, 1\} \} & , & \{ \{-2, 1\}, \{1, 3\} \} & , & \{ \{-1, 1\}, \{3, 4\} \} \\ 1 & & 2 & & 3 & & 4 & & 5 & & 6 \end{array} \right\}$$

7枚朱子の簡約基底



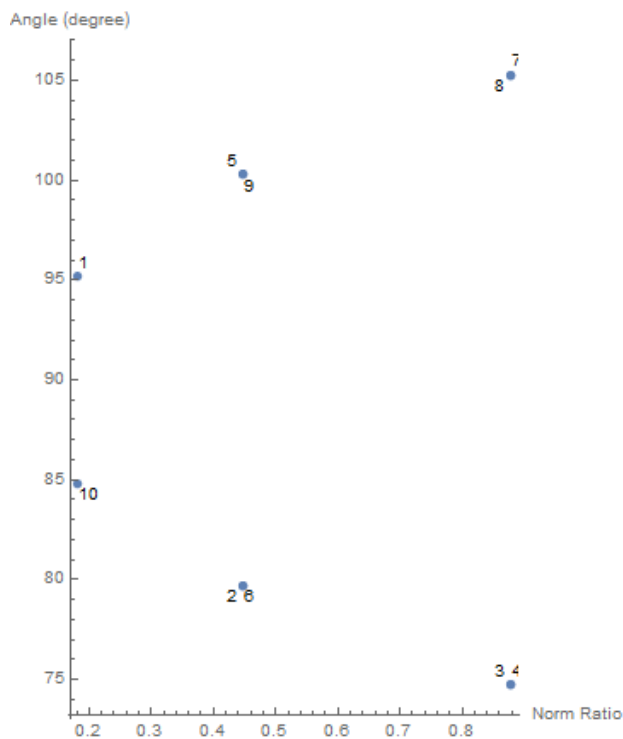
7枚朱子の簡約基底の長さの比と角



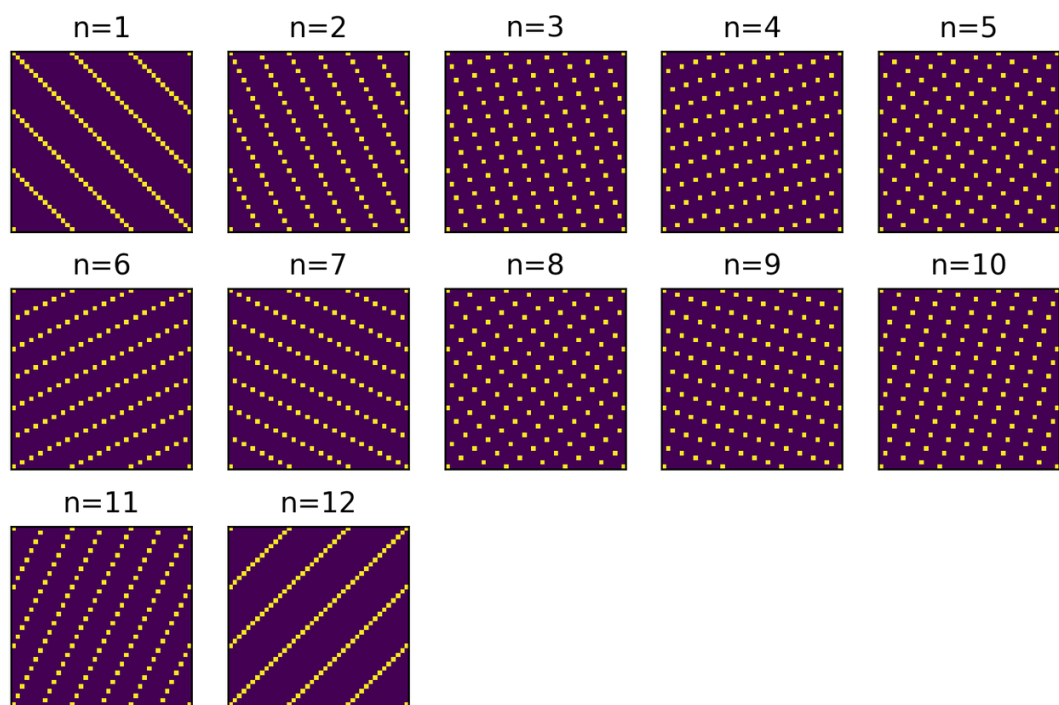
飛び数 $n$ による11枚朱子の違い

$$\left\{ \begin{array}{cccc} \{ (1, 1), (5, -6) \}, & \{ (2, 1), (3, -4) \}, & \{ (3, 1), (2, -3) \}, & \{ (-1, -3), (3, -2) \}, \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ \{ (1, -2), (4, 3) \}, & \{ (1, 2), (-4, 3) \}, & \{ (-1, 3), (-3, -2) \}, & \{ (-3, 1), (2, 3) \}, & \{ (-2, 1), (3, 4) \}, & \{ (-1, 1), (5, 6) \} \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{array} \right\}$$

### 1 1 枚朱子の簡約基底



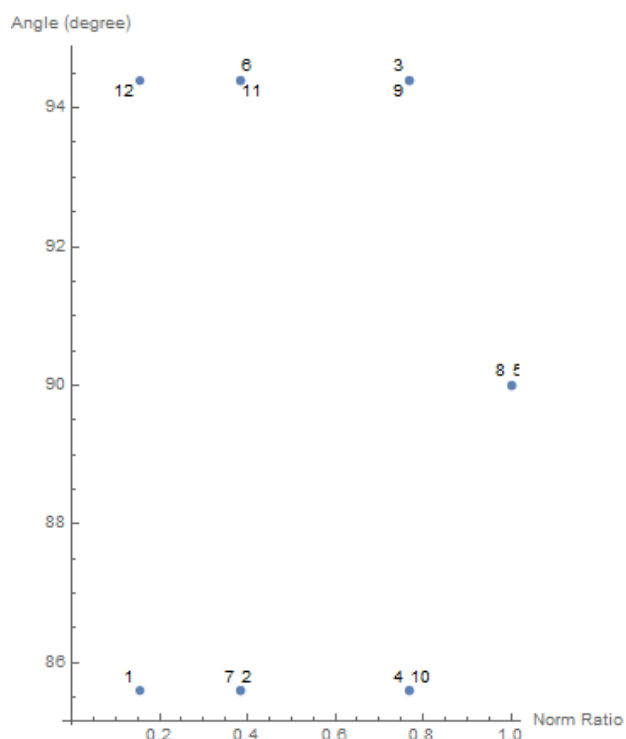
### 1 1 枚朱子の簡約基底の長さの比と角



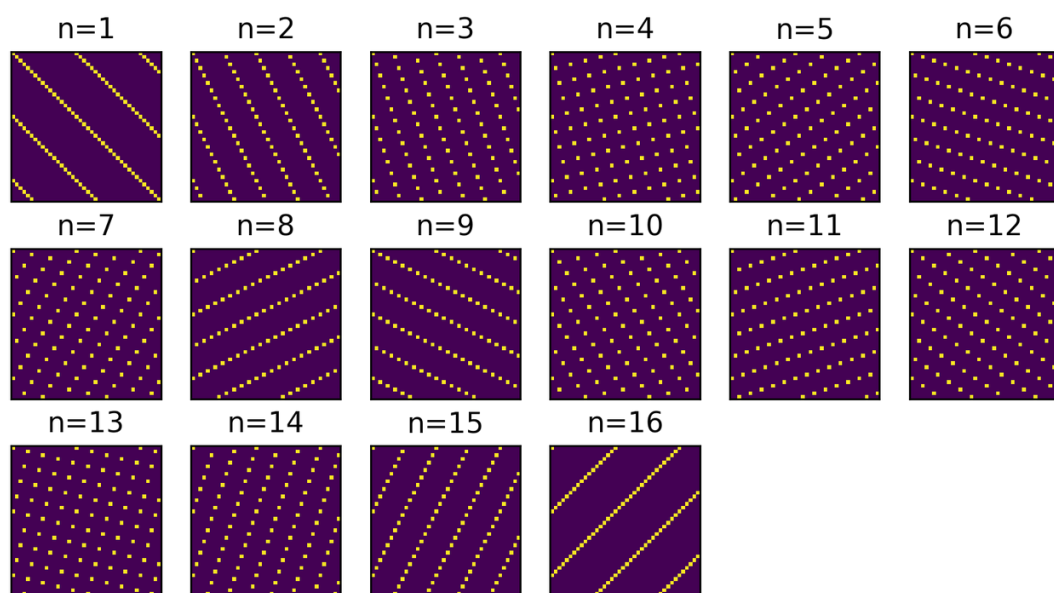
飛び数 $n$ による13枚朱子の違い

$$\left\{ \begin{array}{cccccccccccc} \{ \{1, 1\}, \{7, -6\} \}, & \{ \{2, 1\}, \{3, -5\} \}, & \{ \{3, 1\}, \{1, -4\} \}, & \{ \{1, -3\}, \{4, 1\} \}, & \{ \{3, -2\}, \{2, 3\} \}, & \{ \{1, -2\}, \{5, 3\} \}, & \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & \\ \{ \{1, 2\}, \{-5, 3\} \}, & \{ \{3, 2\}, \{-2, 3\} \}, & \{ \{1, 3\}, \{-4, 1\} \}, & \{ \{-3, 1\}, \{1, 4\} \}, & \{ \{-2, 1\}, \{3, 5\} \}, & \{ \{-1, 1\}, \{7, 6\} \} \\ 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \end{array} \right\}$$

13枚朱子の簡約基底



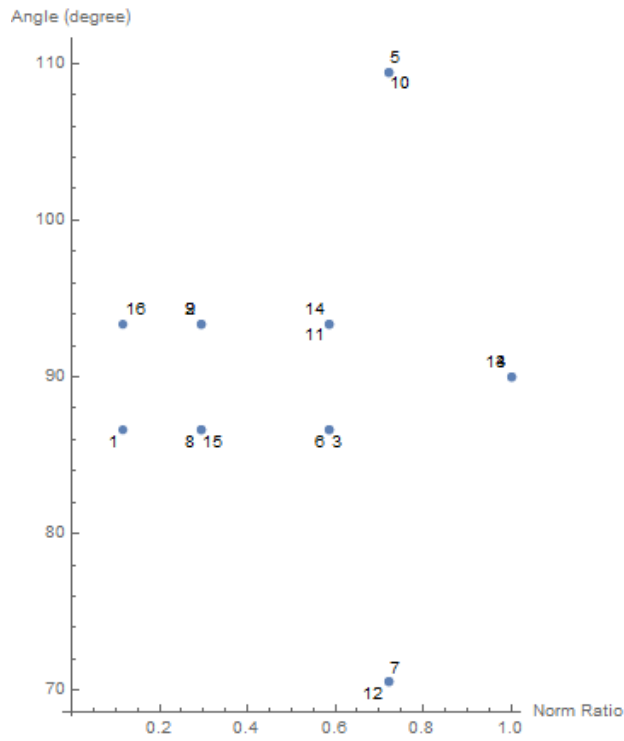
1 3枚朱子の簡約基底の長さの比と角



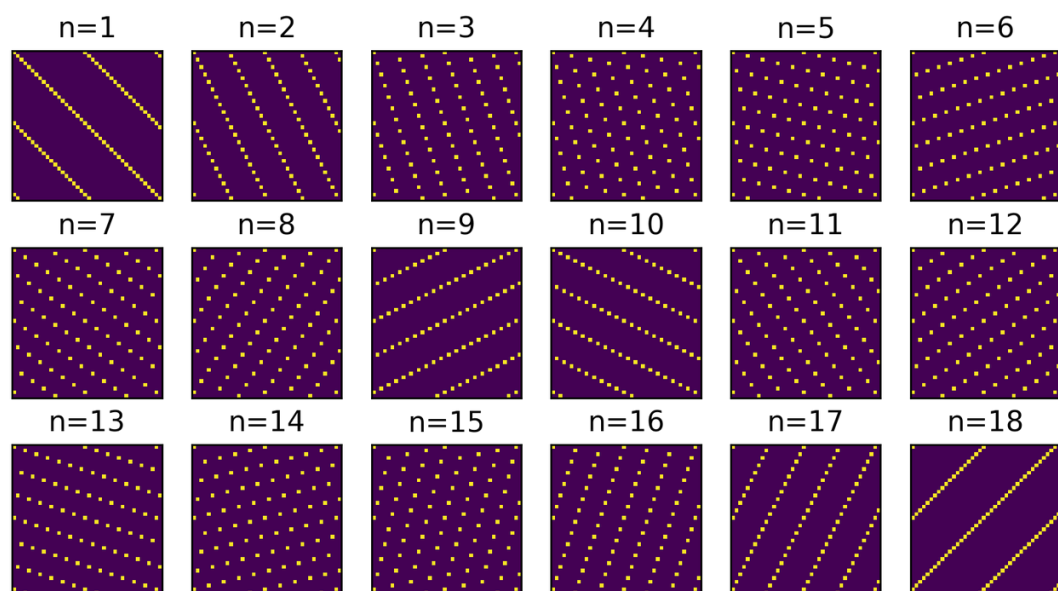
飛び数 $n$ による1 7枚朱子の違い

$\{ \{ (1, 1), (9, -8) \}, \{ (2, 1), (3, -7) \}, \{ (3, 1), (2, -5) \}, \{ (4, 1), (1, -4) \}, \{ (2, -3), (3, 4) \}, \{ (-1, -3), (5, -2) \}, \{ (3, -2), (4, 3) \}, \{ (1, -2), (7, 3) \},$   
 $\{ (1, 2), (-7, 3) \}, \{ (3, 2), (-4, 3) \}, \{ (-1, 3), (-5, -2) \}, \{ (2, 3), (-3, 4) \}, \{ (-4, 1), (1, 4) \}, \{ (-3, 1), (2, 5) \}, \{ (-2, 1), (3, 7) \}, \{ (-1, 1), (9, 8) \} \}$

### 17枚朱子の簡約基底



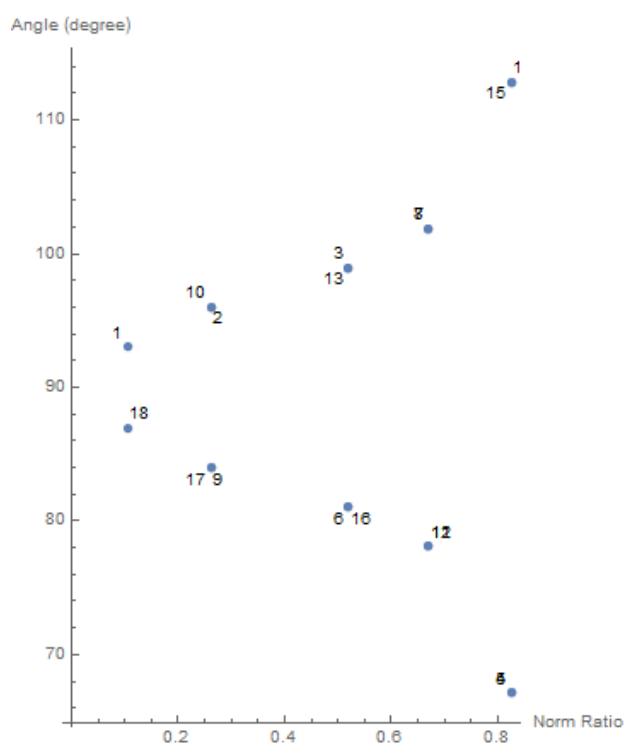
### 17枚朱子の簡約基底の長さの比と角



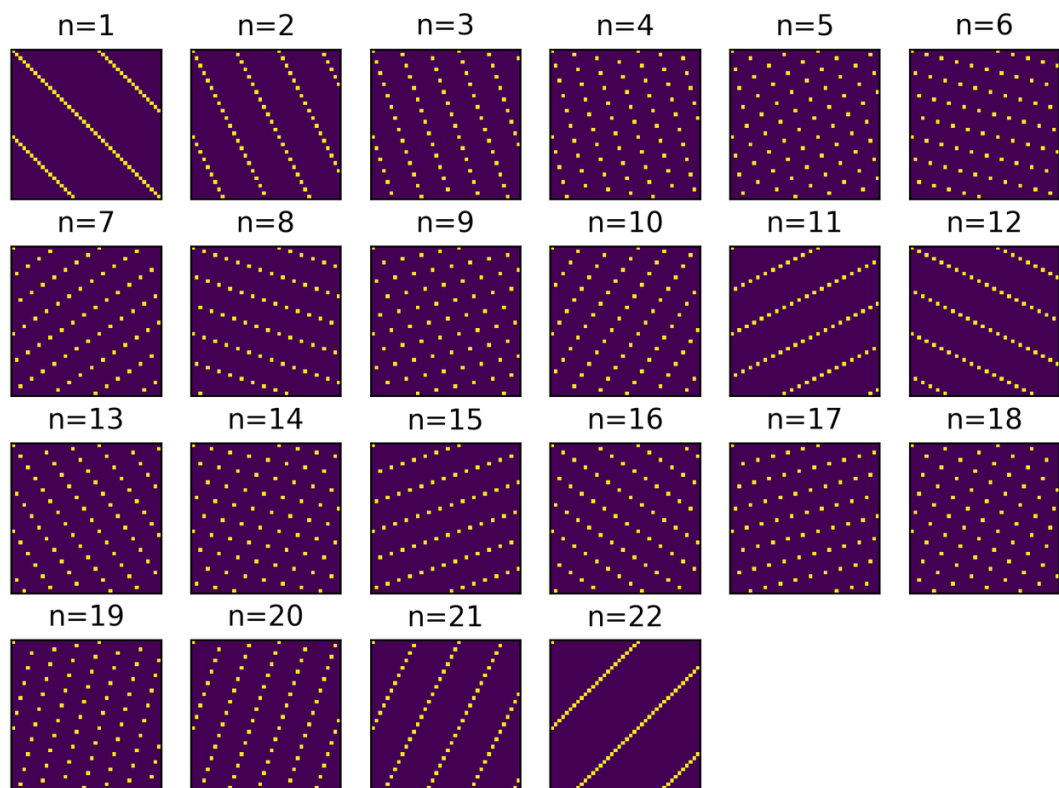
飛び数 $n$ による19枚朱子の違い

$$\left\{ \begin{array}{l} \{ \{1, 1\}, \{9, -10\} \}, \{ \{2, 1\}, \{3, -8\} \}, \{ \{3, 1\}, \{1, -6\} \}, \{ \{4, 1\}, \{3, -4\} \}, \{ \{-1, -4\}, \{4, -3\} \}, \{ \{1, -3\}, \{6, 1\} \}, \\ \{ \{-2, -3\}, \{5, -2\} \}, \{ \{3, -2\}, \{2, 5\} \}, \{ \{1, -2\}, \{8, 3\} \}, \{ \{1, 2\}, \{-8, 3\} \}, \{ \{3, 2\}, \{-2, 5\} \}, \{ \{-2, 3\}, \{-5, -2\} \}, \\ \{ \{1, 3\}, \{-6, 1\} \}, \{ \{-1, 4\}, \{-4, -3\} \}, \{ \{-4, 1\}, \{3, 4\} \}, \{ \{-3, 1\}, \{1, 6\} \}, \{ \{-2, 1\}, \{3, 8\} \}, \{ \{-1, 1\}, \{9, 10\} \} \end{array} \right\}$$

19枚朱子の簡約基底



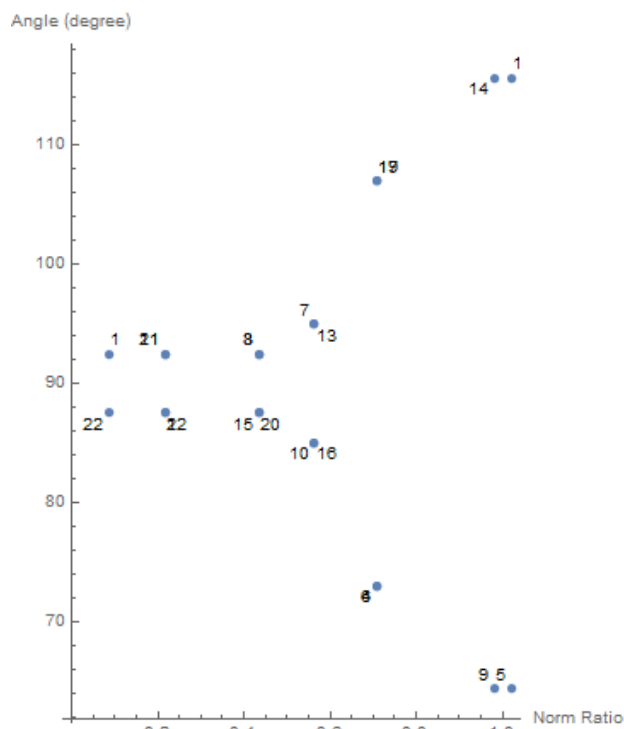
19枚朱子の簡約基底の長さの比と角



飛び数 $n$ による23枚朱子の違い

$\{ \{ (1, 1), (11, -12) \}, \{ (2, 1), (5, -9) \}, \{ (3, 1), (2, -7) \}, \{ (4, 1), (3, -5) \}, \{ (5, 1), (3, -4) \}, \{ (-1, -4), (5, -3) \}, \{ (2, -3), (5, 4) \}, \{ (-1, -3), (7, -2) \},$   
 $\{ (-4, -3), (1, -5) \}, \{ (3, -2), (4, 5) \}, \{ (1, -2), (9, 5) \}, \{ (1, 2), (-9, 5) \}, \{ (3, 2), (-4, 5) \}, \{ (-4, 3), (-1, -5) \}, \{ (-1, 3), (-7, -2) \},$   
 $\{ (2, 3), (-5, 4) \}, \{ (-1, 4), (-5, -3) \}, \{ (-5, 1), (3, 4) \}, \{ (-4, 1), (3, 5) \}, \{ (-3, 1), (2, 7) \}, \{ (-2, 1), (5, 9) \}, \{ (-1, 1), (11, 12) \} \}$

23枚朱子の簡約基底



2 3 枚朱子の簡約基底の長さの比と角

## 織りと行列

### 織機

#### ジャカード織機の仕組み

- 各タテ糸をすべて上下させる
- タテ糸の浮かせ方は2タテ糸の本数通り

#### ドビー織機の仕組み

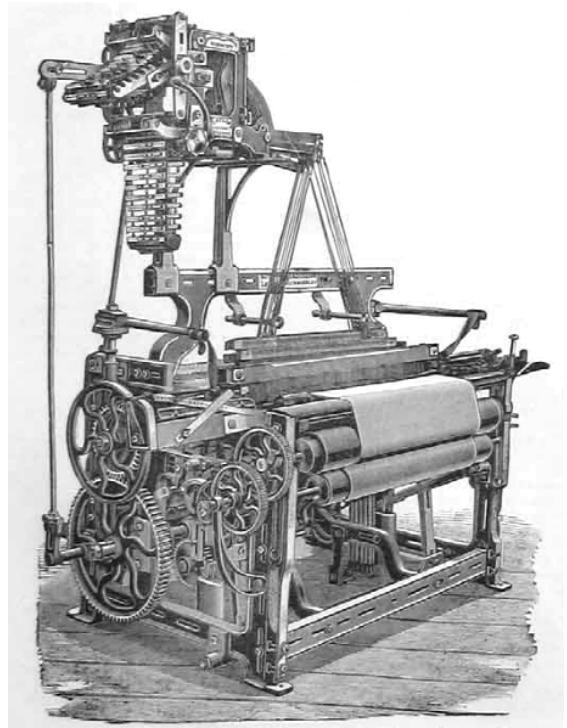
- タテ糸を綜統に通し，綜統を上下させる
- タテ糸の浮かせ方は2綜統の枚数通り



ジャカード織機

anonymous

([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DMM\\_29263ab\\_Jacquardwebstuhl.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DMM_29263ab_Jacquardwebstuhl.jpg)), „DMM 29263ab Jacquardwebstuhl“, <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode>

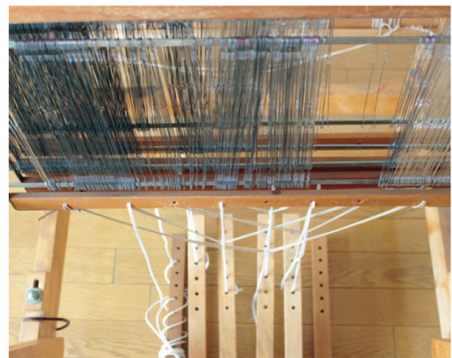


ドビー織機

([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TM158\\_Strong\\_Calico\\_Loom\\_with\\_Planed\\_Framing\\_and\\_Catlow%27s\\_Patent\\_Dobby.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TM158_Strong_Calico_Loom_with_Planed_Framing_and_Catlow%27s_Patent_Dobby.png))

### 手織り機の仕組み

- 踏み木を踏んで、綜絢を上下させる
- 踏み木と上がる綜絢の組み合わせをタイアップさせる
- タテ糸の浮かせ方は踏み木の本数しかない

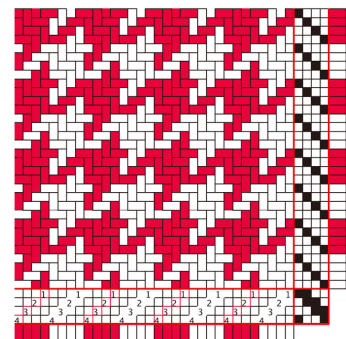
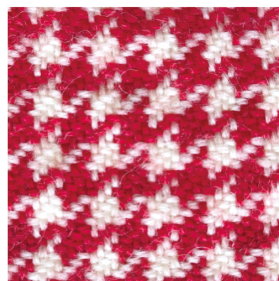
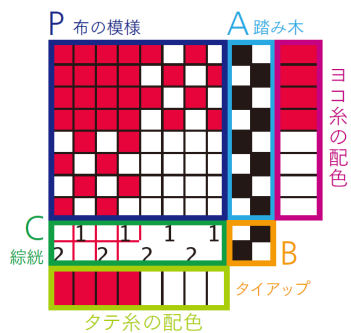


綜絢と踏み木

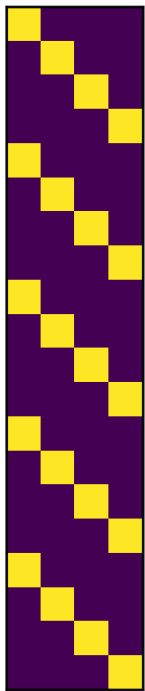
『数学から創るジェネラティブアート』第8章

## 手織りと行列演算

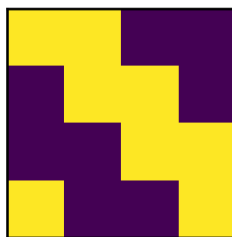
- 綜絢・踏み木・タイアップのデータから生成
- 各データから組織が決まる
- 行列の積と見なせる



A: treadling



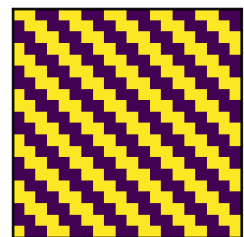
B: tie-up



C: threading



P: preview



行列の積  $ABC = P$  による組織図生成

組織生成の自由度が上がっても、実際に「織れる」組織のパターンは多くはない。  
手織りは組織生成の自由度は下がるが、有史以来の技術の蓄積を使える。

## 手織りの拡張

- 行列サイズの巨大化
- 多層織り(複数のヨコ糸)=テンソル演算

## Trial 1：準周期的な組織生成

### 再帰性を使ったパターン生成 (Ralph Griswold)

ペンローズタイリングなど準周期的なタイル張りは再帰的なシステムを使って構成できる

- L-system
  - 記号, 初期状態, 遷移規則の組からなるシステム

- 例：Fibonacci Word ( $\{A,B\}$ ,  $A$ ,  $\{A \rightarrow AB, B \rightarrow A\}$ )
  - $A \rightarrow AB \rightarrow ABA \rightarrow ABAAB \rightarrow ABAABABA \rightarrow \dots$
- 文字に数列を対応させ，そこから綜統・踏み木のパターンをつくる



## Trial 2：動きのある柄の表現

手織りでは行列サイズが小さすぎて曲線的な柄や連続的な諧調表現が難しいが，ジャカードでは可能．

### Network Drafting (Alice Schlein)

波形から綜統・踏み木のパターンをつくる

- 周波数によって波に動きをつける
- ノイズ関数によってゆらぎをつくる

### ぼかし織り

綾の太さを連続的に変化させることで，連続階調をつくる

### 多層織り

異なるヨコ糸を重ねる．行列をテンソルに拡張する．

---

## Trial 3：フィルター処理による組織密度調整

組織は粗密の具合を調整する必要がある．画像のフィルター処理を使って，過密部分と過疎部分にマスクをかける．行列演算によって近傍セルに含まれる組織点を数えることができる．

---

## Trial 4：多重織り

複数枚の布を同時に重ねて織る技法．伸縮率の異なる素材を多重に織る「からぶくれ」技法で，凹凸のある手触りをつくることができる．

---

## これからの課題と応用

- 格子構造(周期性)/再帰構造(準周期性)と布の材質の関連
- 糸素材と多重織り
- 画像処理，機械学習的なアプローチ

# 多孔質柔軟素材を用いたフィジカルインタラクション (Physical Interaction Using Porous Soft Materials)

中丸 啓, Satoshi Nakamaru

東京大学

The University, of Tokyo

(Joint work with Ryosuke Nakayama<sup>1</sup>, Ryo Suzuki<sup>2</sup>, Ryuma Niiyama<sup>3</sup>, Yoshihiro Kawahara<sup>3</sup> and Yasuaki Kakehi<sup>3</sup>)

1. Keio University, 2. University of Colorado Boulder 3. The University of Tokyo

Physical interaction with soft materials has been actively studied in the area of HCI and other fields. Here we introduce our previous studies on the interaction with soft materials.

In the FoamSense project [2], we introduce a method to obtain the deformation state of an object by utilizing the material's structure. In the MorphIO project[1], we focus on soft robotics as an output mechanism. And introduce a method to design various motions by recording and feeding back hand-operated inputs. In both projects, physical models to predict material properties changes due to structural changes and fabrication are essential for sensing and behavioral design. We will share the current status and challenges of these projects.

## REFERENCES

- [1] Nakamaru, S., Nakayama, R., Niiyama, R., & Kakehi, Y. (2017, October). FoamSense: Design of three dimensional soft sensors with porous materials. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 437-447).
- [2] Nakayama, R., Suzuki, R., Nakamaru, S., Niiyama, R., Kawahara, Y., & Kakehi, Y. (2019, June). MorphIO: Entirely Soft Sensing and Actuation Modules for Programming Shape Changes through Tangible Interaction. In *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference* (pp. 975-986).

INTRODCUTION| Soft Sensors

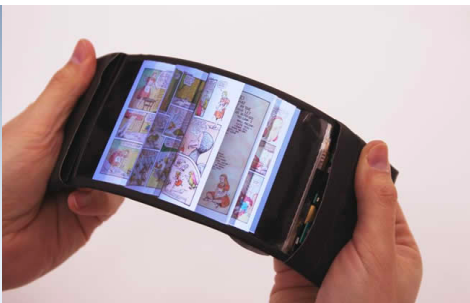
Soft sensors expand user experiences in HCI fields

Haptic experience



Walt Disney, “Big Hero6”, 2014

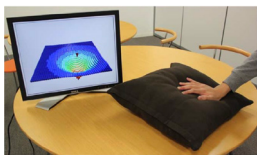
More intuitive operation



P. Strohmeier et. al., *TEI* '16, 2016

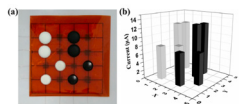
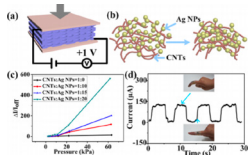
RELATED WORKS

Photo Reflector



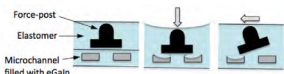
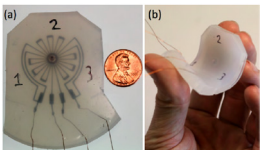
Y. Sugiura et. al., *UIST* '11, 2011

Soft material



H. Zhang et. al., *Appl. Mater. Interfaces*, 2016

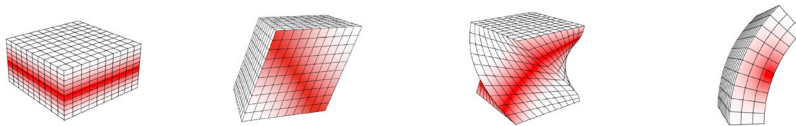
Liquid Metal Deformation



D. Vogt et. al., *Sensors* '12, 2012

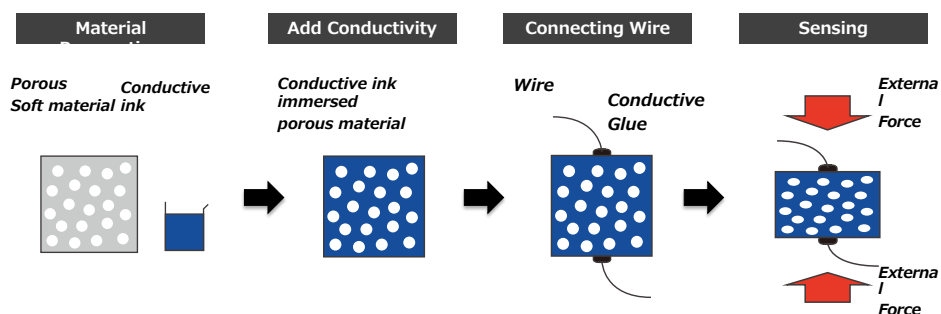
## OUR TARGET

Develop the new soft sensor that can detect the various deformation made of only soft and safety materials by simple fabrication process



## WHAT IS FoamSense?

FoamSense is soft sensor that utilizes physical property and structure of porous soft materials



## OUR CONTRIBUTIONS

### Develop new soft sensor

- Explained design process of FoamSense
- Proposed basic design guideline for ink's pattern and wiring

### Evaluation

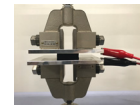
- Evaluated characteristics for each materials
- Summarize information for selecting proper materials
- Discussed limitation and future works

### Digital Fabrication

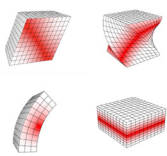

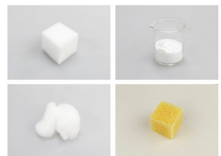

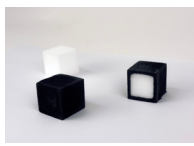
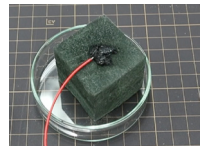
- Demonstrated improved FoamSense made by digital fabrication process

### Implementation

- Demonstrated 3 prototype and possible scenarios

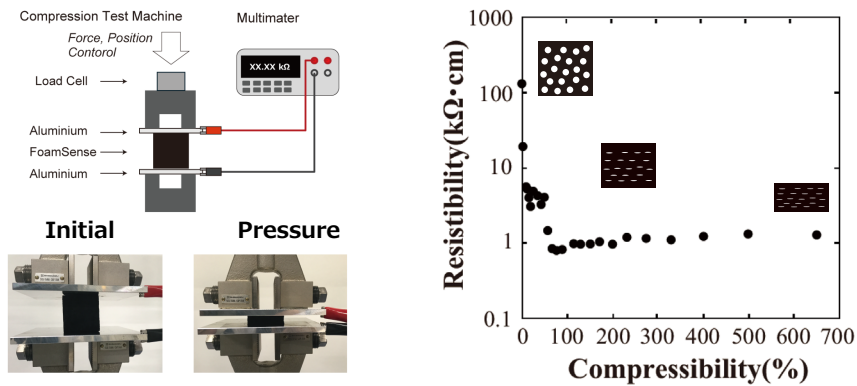


## DEASIGN ELEMENTS of FoamSense

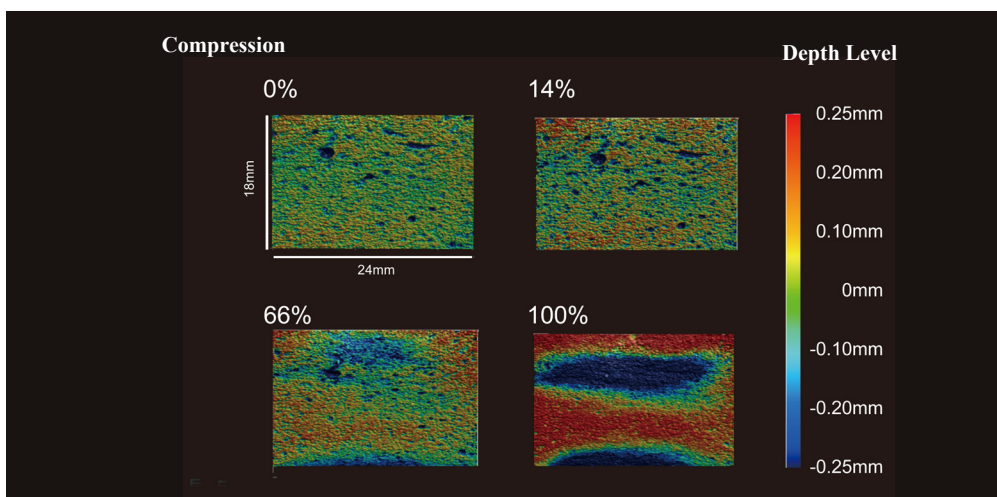
Define	Select Structure and material	Implementation
<p><i>Sensor Mode</i></p>  <p><i>Shape</i></p> 	<p><i>Carrier Structure/ Material</i></p>  <p><i>Conductive Ink</i></p> 	<p><i>Patterning</i></p>  <p><i>Wiring</i></p> 

## BASIC CHARACTERISTICS of FoamSense




### Electrical property follows the structure of material



## BASIC CHARACTERISTICS| Deformation of Porous Material

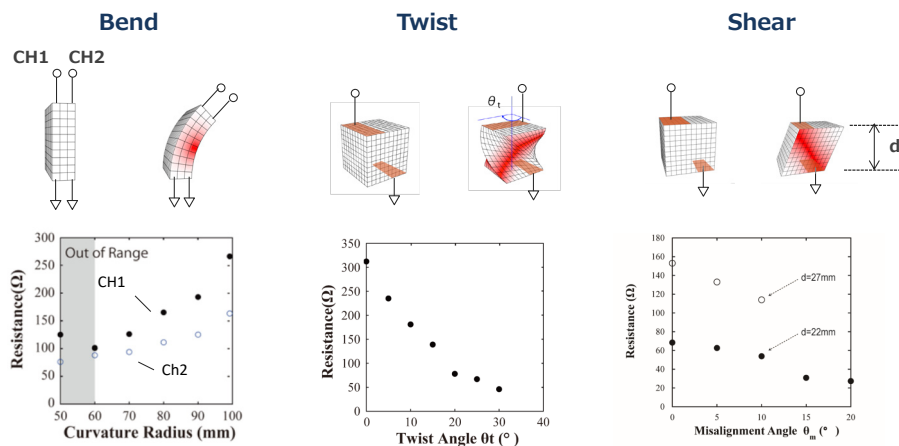


## MATERIAL SELECTION| Carrier Structure

	Carrier Structure		
	Sponge	Fibrous	Beads-packed
			
Elements			
Representative Material	Melamine	Cotton	Poly styrol beads
How to mold	Cutting, Molding	Filling into shell	Filling into shell
Mechanical Property control	Material, Hole Structure	Density, Shell material	Beads and Shell materials
Other	Relatively homogeneous	Slow response	Stretchable Difficult to make pattern

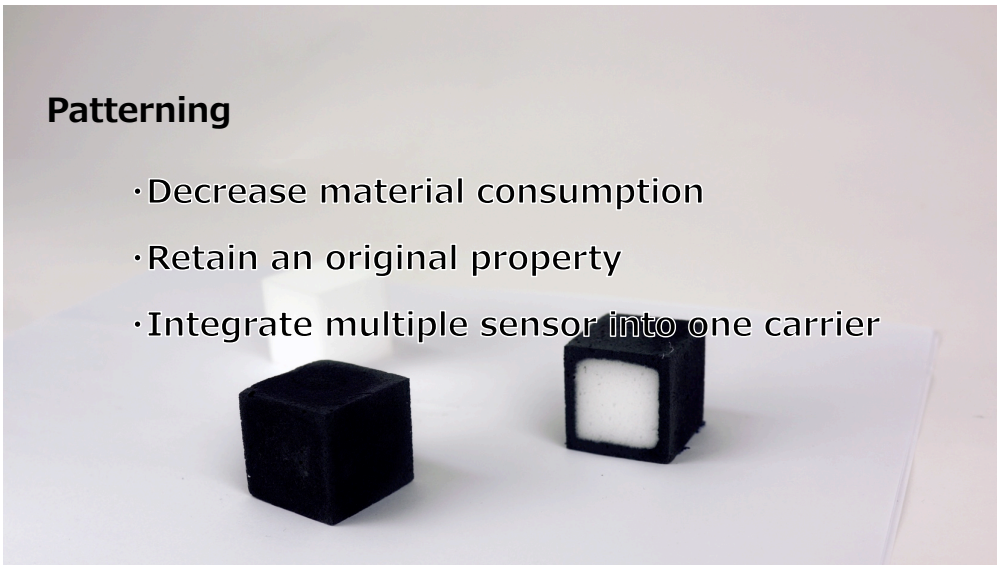
## SENSOR MODE DEMONSTRATION

### Various deformation can be detected



## Patterning

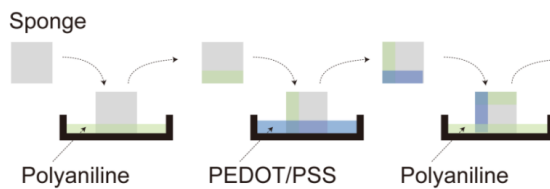
- Decrease material consumption
- Retain an original property
- Integrate multiple sensor into one carrier



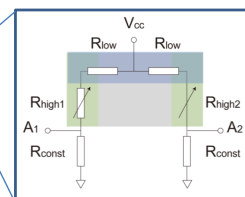
## Patterning

### Patterning technique expands sensor variation

*Manufacturing Process*



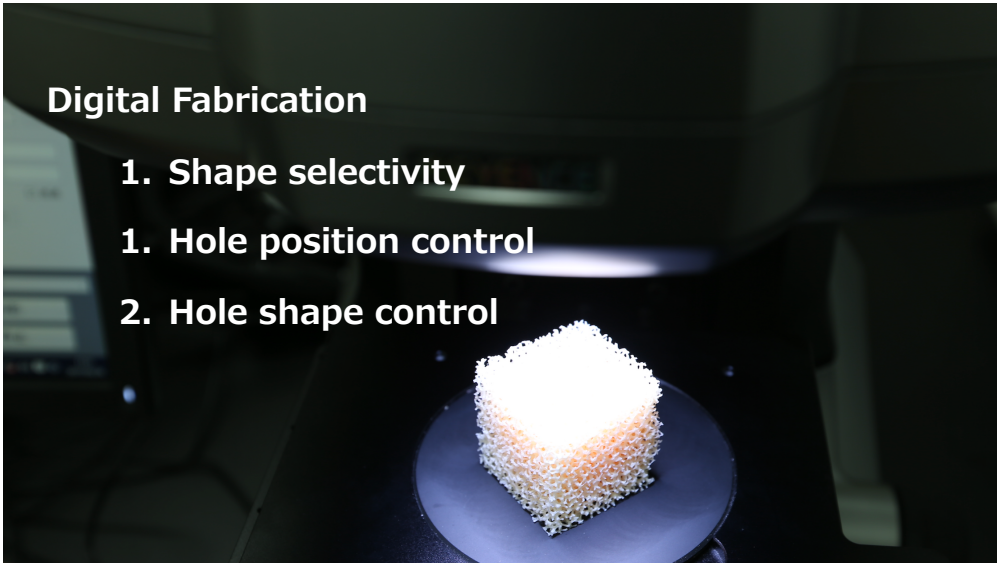
*Circuit model*



Polyaniline:  $<10 \text{ S/cm}$   
PEDOT/PSS:  $\sim 100 \text{ S/cm}$

## Digital Fabrication

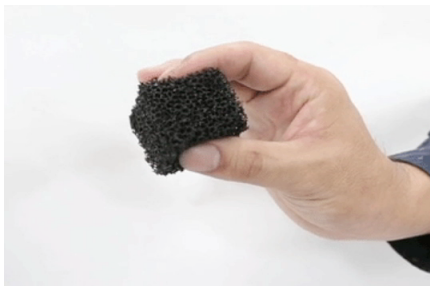
1. Shape selectivity
1. Hole position control
2. Hole shape control



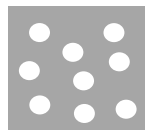
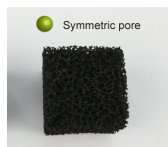
## Digital Fabrication

We can design the hole structure of carrier material

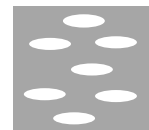
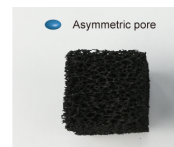
3D Printed Sponge  
(Silicone sponge)



Symmetric pore

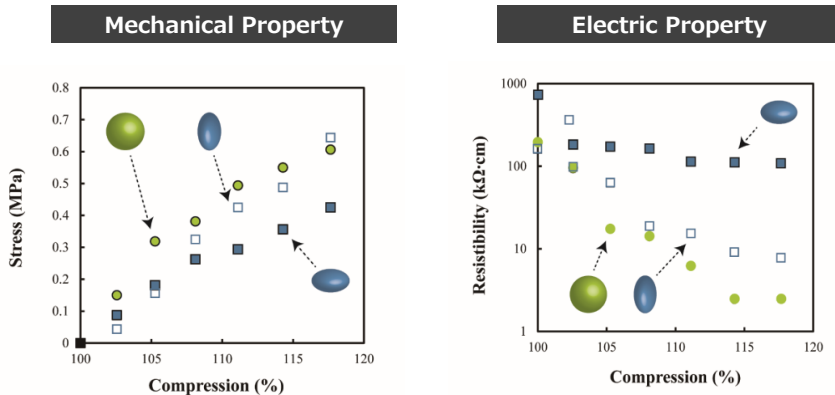


Asymmetric pore



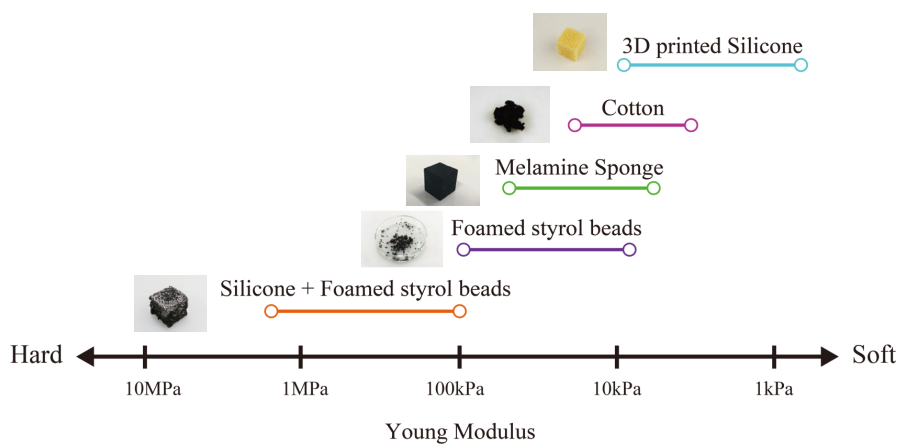
## Digital Fabrication

Anisotropy can be imparted by designing hole structure



## MATERIAL LIBRARY|

Mechanical Property of Representative material



## Future Vision of MorphIO

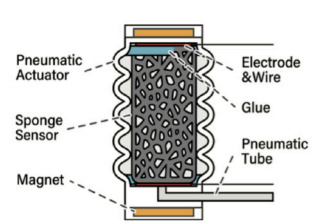
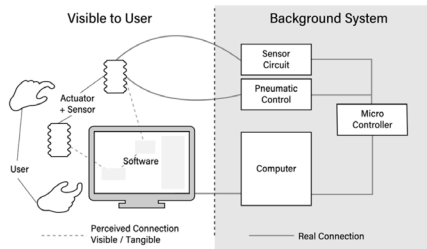
Various behavior and interaction of soft objects through tangible interaction, just like sculpting a shape with clay



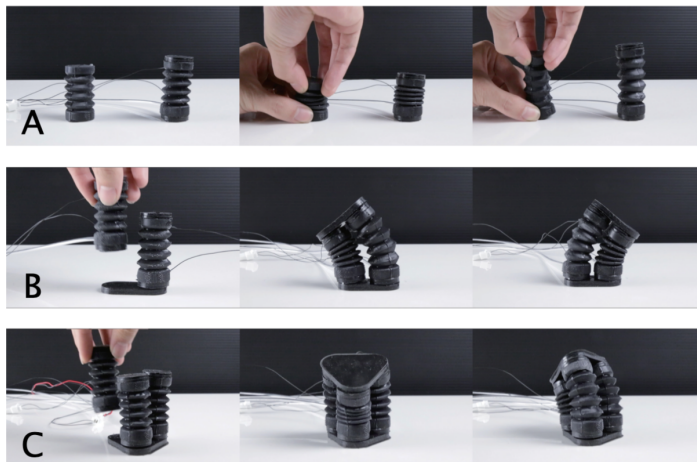
## Summary of Contribution

1. MorphIO, a modular and integrated design of an entirely soft sensor and actuator unit for programming by demonstration of soft robots and shape-changing interfaces
2. A novel design and fabrication of elastic conductive sponge sensors and its technical evaluation
3. A graphical user interface to record, playback, customize, and synthesize the physical motion of multiple MorphIO units
4. Application scenarios that demonstrate how MorphIO can allow the HCI and robotics communities to prototype movements
5. A user evaluation study with six participants that shows the benefits and limitations of MorphIO, as compared to the existing

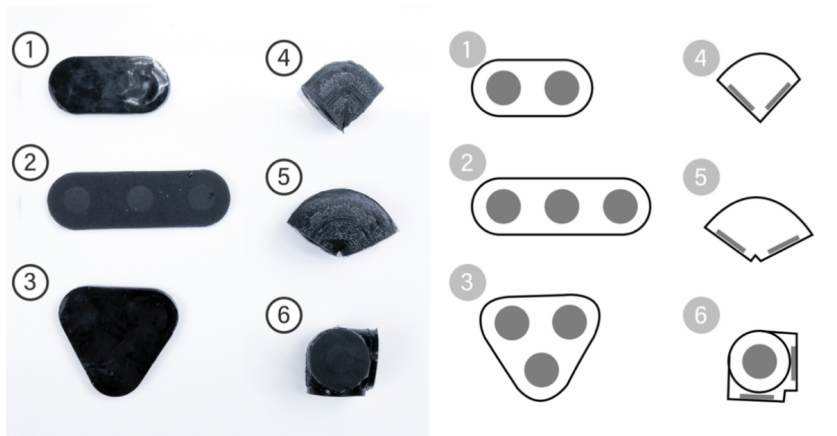
## MorphIOのシステム概要



## Workflow of MorphIO



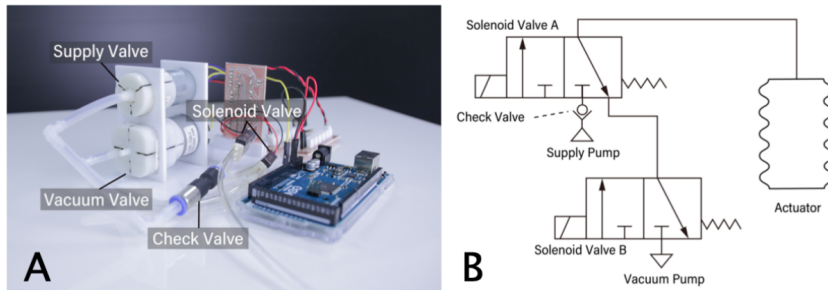
## Connector design



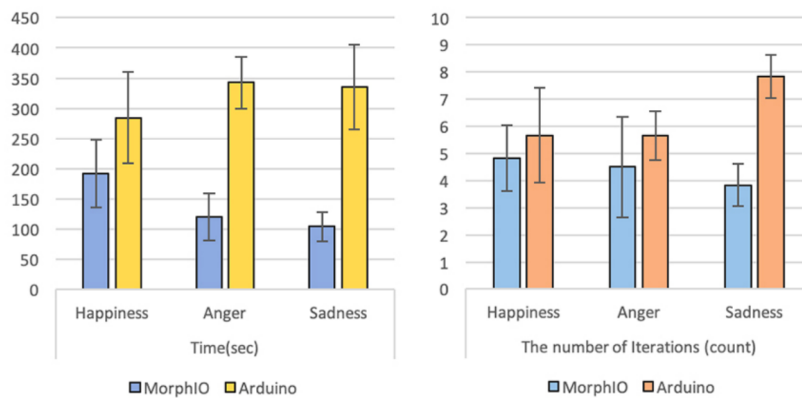
## The GUI to visualize the recorded sensor values in timeline



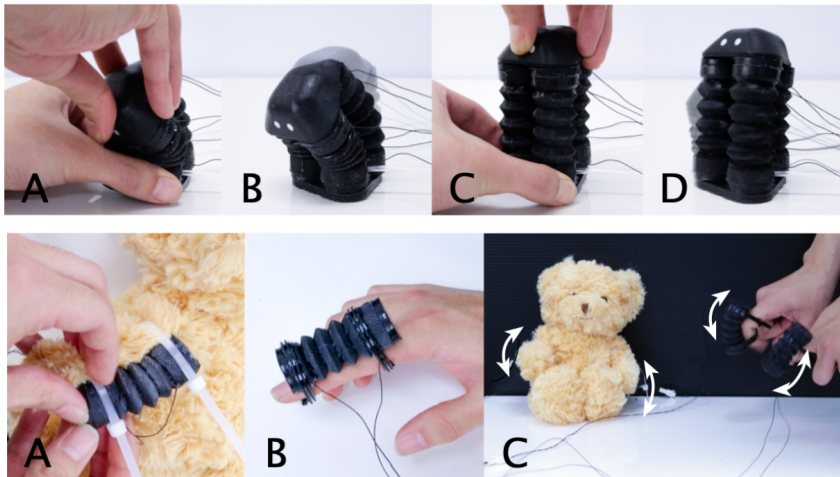
## HW System of MorphIO



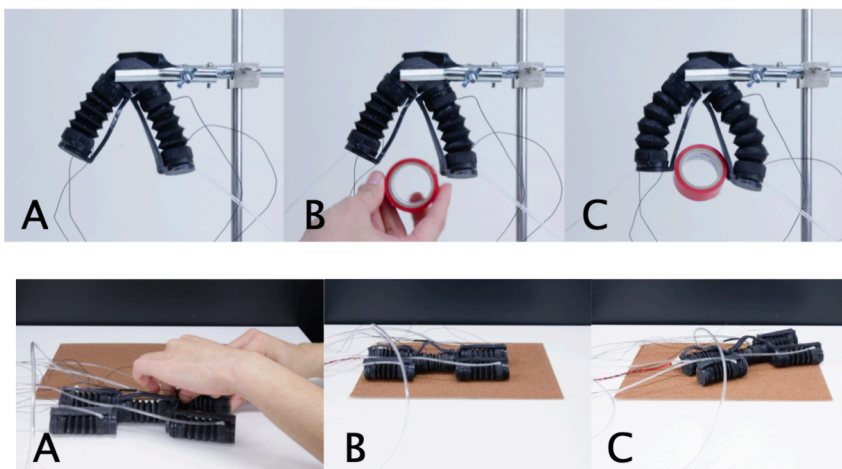
## User Study Results



## Demonstrations of MorphIO



## Demonstrations of MorphIO



## Conclusion

MorphIO is a soft sensing and actuation module for programming by demonstration of soft robots and shape-changing interfaces. Our main contribution is the integrated and entirely soft input and output capability of the MorphIO unit. We describe the design and fabrication method of a novel conductive elastic sponge sensor and an integrated pneumatic actuator.

By leveraging this capability, MorphIO allows the user to interactively program physical behaviors through tangible interaction. Our user study results confirm the benefits of MorphIO, compared to the existing programming approach. Finally, we envision a future where people can interactively explore various behaviors and dynamics of soft objects in the physical world, just like sculpting a shape with clay.

### 今後の発展で期待すること

#### 現状

デジタルファブリケーション → 特定の素材で多孔質材料の構造を制御できるようになりつつある

特性予測 → 物性情報があれば特性をある程度予測できる

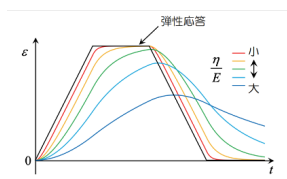
#### 将来

必要な特性に合わせて多孔質体の構造を設計できる

→ センサの硬さチューニングや応力変形の線型性の確保ができる

(S-Sカーブが線型になるような構造の計算)

→ 動的特性の理解を深めたい (孔構造の破壊モデルは?)







レイ・トレーシングを基にした大域照明を計算する手法である、パス・トレーシングによって作成  
毛羽立ちをチューブで形作り経年劣化を再現することによりリアルな画像を生成することが出来る

This report briefly surveys recent research related to cloth visualization. Many studies, including cloth simulation, procedural modeling, shading models, and pattern manipulation, have been presented at computer graphics conferences. By introducing some of them with explanations without excessive use of technical terms, we hope to help non-specialists in this field.

## はじめに

このレポートは近年の布の可視化に関連する研究を紹介することを目的としています。直接可視化をおこなう技術であるレンダリングをはじめ、シミュレーションや型紙の操作など布に関連する研究の多くはコンピュータ・グラフィックスの学会で多く発表されています。それらの一部を簡単な解説とともに紹介することで、専門外の方が学ぶ際の助けになればと考えます。

紹介する内容は

1. レイ・トレーシング、パス・トレーシングを使った可視化
2. 形状の作成方法(プロシージャラル、シミュレーションによる)
3. 質感について

となっています。

## パス・トレーシング

まず、パス・トレーシングのベースとなっているレイ・トレーシングについて簡単に説明します。日本語では光線追跡法と呼ばれる非常に単純な手法で、視点からあるピクセルを通過する光線を投げ、一番手前にあるものの情報をそのピクセルに記録する、というものです。記録する情報は一般的には光線が当たった点の明るさになりますが、そのオブジェクトの番号であったり、当たった点の面の向きであったり、目的によって、記録するものは異なります。

レイ・トレーシングの核になるのが、交差判定という処理で、これ自体ひとつの大きな研究テーマになっています。具体的に交差判定が何をするかですが、視点から出てスクリーンを通過する直線と三角形や、球といった物体との交点を求めます。例えば、球の場合は球を  $x^2+y^2+z^2=R^2$  といった方程式で表し、これに直線を表す式を代入して交点の座標を求めます。ぱっと思いつくものに対しての計算方法自体は、過去の研究でやりつくされていて、Ray Tracing Resources Page(<http://www.realtimerendering.com/intersections.html>)から実装例を知ることが出来ます。交差判定の難しさというのは、計算のコストや数値エラーをいかに減らすかという点にあります。

服を面としてとらえる場合は、その面を小さいポリゴン(主に三角形)の集合としてあらわすため、交差判定は基本的に直線と平面との交点を求めるだけであり、比較的に容易に行えます。しかし、糸や繊維レベルで布をとらえる場合、交差判定は難しくなります。これについては、まだ活発な研究がなされています。繊維は太さの変わるチューブとして表すことが出来ます。単純な交差判定の方法は、その太さの変わるチューブというのを、複数の球と円錐をつなげたもので表すというもので(Ray Tracing Generalized Tube Primitives)、刻みを細かくすれば十分うまく近似できます。近似のない方法としては直線とチューブとの交点を直接求めるというもので、最近では Phantom Ray-Hair Intersector という手法が提案されています。

さて、交点が求めれば解決かというそうではなく、もう一つ難しい問題があります。例えば、服を繊維レベルで表現する場合には特に膨大な数の糸や繊維を扱う必要があります。数本であれば総当たりで交差判定を行い、もっとも近くにあるものの情

報をピクセルに書き込めばよいですが、膨大な数がある場合、総当たりで計算することは不可能です。これもまた大きな研究テーマであり、現状は BVH(Bounding Volume Hierarchy)というデータ構造を使ったコストの軽減がデファクトスタンダードになっています。

ここで物体を何らかの方法で2つのグループに分けることを考えてみます。交差判定の際、先に視点に近いほうのグループに含まれる物体との交差判定を行います。交点が見つからなければ、次に遠いほうのグループに含まれる物体との交点を探します。こうすることで総当たりを避けることが出来ます。例えば、1万本糸があった場合、半分にしても5千本で、まだ時間がかかります。このように実際には、2つのグループ分けだけでは不十分なので、BVHにより階層的にグループ分けしていくことによって効率よく交点を見つけます。

さて、今ある点を見ているとします。この点の明るさはどうやって求めるでしょうか？光というのは、光源からも含めてこの点に、あらゆる方向から飛んできます。それが見ている人の方へ反射なり屈折なりして飛んできて、この床の一点が見えるわけです。大雑把に言うと、入ってきた光の総和を求めることでこの点の明るさを求めることが出来ます。ただし、ただ足し合わせるだけでは不十分で、実際には重み付きの和を計算します。それぞれの光線について、入ってきた方向から、見ている人の方向へのどのくらい反射するか、屈折するか、を掛け合わせます。

さて、カメラをシミュレーションして画像を生成しようとした場合、光源から飛んでくる光の粒を追跡しても、なかなかイメージ・センサーに当たりません。したがって、コンピュータでシミュレーションする場合には、計算効率を上げるため、センサー側から逆に光の道をたどります。ヘルムホルツの相反性によって、幸い光の経路を反対にたどっても、全く同じ明るさが計算できます。光は目に届くまでに、壁や天井など、いろいろな物体に当たります。明るさを計算するには、光線を再帰的に追跡します。パス・トレーシングはセンサー側から光の道を光源までたどって、見えている部分の明るさを求める手法です。

## 形状

布の見え方というのは、布の形状・構造と光学的な特性とによって決まります。これらははっきりと切り離すことが出来るわけではありません。構造というのは織りや、編みとかいった大きなスケールのものから、糸のより、繊維のまとまり具合などといった細かいものまで含みます。繊維のまとまり具合やばらつきというのは保温性といった機能ばかりでなく、見え方も大きく左右します。

布、生地形状というのは非常に複雑で、コンピュータ・グラフィックス、また、実際の布においてもそうだと思いますが、人が扱える最小構成単位は繊維です。紡績や紡糸という工程で、短い繊維や長い繊維を糸にします。そのあと糸によりをかけたリ、加工を行ったのち、織ったり編んだりして布にします。コンピュータ・グラフィックスではしばしば生地の厚さを無視して、ポリゴン(多くの場合は小さな三角形)の集合で表します。場合によってはボリュームで表現することもありますし、最近では糸や繊維をそのままチューブとして取り扱うことも増えてきました。

もともと布は繊維や糸でできているので、それらをそのまま表すのが最も自然であるわけですが、データ量の問題や計算時間の観点から、ポリゴンによる近似やボリュームによる近似が用いられます。ポリゴンで近似する場合は、もちろん解像度に依存しますが、一般的にチューブで表すよりもデータ量が少なく、遠景での表現に向きます。テクスチャで模様をつけたり、法線マップというテクスチャを用いて面の法線を場所ごとに無理やり曲げることで、糸の凹凸を再現したりします。ゲームなど計算資源が限られた環境に向く一方、浅い角度で見た場合にシルエットが単調になるなど表現力が限定されます。ボリュームは、繊維を雲のようなものとしてとらえ、3次元のグリッドに繊維や糸の情報を濃淡値として格納します。ふわふわした綿を遠くから見ると雲のように見えます。階層構造を持たせておけば、Level of Details(LODs)といって近景から遠景までをシームレスに表現することもできます。ボリュームとして扱う場合は、先ほど取り上げたパス・トレーシングをボリュームに拡張したものをを用いて明るさの計算をします。

チューブは取り扱いのコストが高いと考えられますが、近年のコンピュータであれば十二分に取り扱うことが出来ます。また、遠景では先ほど紹介した交差判定における数値誤差などから問題が生じやすいですが、回避するためのテクニック・研究も多くあり、今後はチューブによる表現が主流になると考えられます。技術の発展に伴って、間違いなく現実世界にあるものをそのまま表そうとする流れになるためです。ですので、ポリゴンやポリウムについてはここでは省略しますが、後ほどで質感の所で少し触れます。

糸の表現にはプロシージャルなモデルが用いられます。一般的には、同軸のヘリシス、螺旋、によって表現します。関連する文献としては

*Luan et al. "Fiber-Level On-the-Fly Procedural Textiles"*

*Wu and Yuksel, "Real-time Fiber-level Cloth Rendering"*

などがあります。簡単に螺旋でモデルできました、と言いたいところですが、糸一つとっても、そう単純ではありません。まず、よりの方向(S字とZ字)によっても、織った際に、光沢の現れ方、伸縮のしやすさの方向、などが変化します。こだわっているデニムもあるそうです。また、単純な螺旋、コイル状の形状では実際にある糸すべてをうまく表すことは不可能です。当然ながら、糸の繊維の密集具合や扁平率は糸にかかるテンションなどでも変わってくるので、本当にリアルな画像を生成しようと思えば、糸だけに限定したとしてもやれることは沢山あります。先述のように、実際に画像を作成するときには特に毛羽立ち(Flyaway Fiber)が欠かせない存在で、少し足すだけで一気に布らしく見えるようになります。

糸を表すことが出来れば、次に織りや編みといった構造を考える必要があります。織りについては、巴山さんの書籍でも取り上げられています。コンピュータで織りを扱う場合、共通のフォーマットがあると便利ですが、WIF という少し古いものが存在していて、このフォーマットでパターンを配布しているサイトがたくさん存在します。織り方だけが決まればよいので、実際は画像でも代用可能です。

次に編みです。編みは定番の糸の通し方があります。基本的なスティッチをまとめた *The Essential Stitch Collection* といった書籍や *Stitch Maps* といった有益なサイトもあります。



これまで述べた糸や、織りや編みといった構造をそのまま再現すればコンピュータによって可視化できます。上の画像は、与えられたメッシュを、平編みと平織りしたカーブで表現して、先ほどのパス・トレーシングによってレンダリングしたものです。毛羽立ちは別途追加していますが、とくに左側の平編みのほうでは布特有の柔らかそうな質感が再現できていることが分かるかと思います。光の散乱モデルにはどちらも同じものを使用していますが、構造の違いのみで全く異なる印象になります。

さて「編み」、に関してはたくさんの論文がすぐに見つかります。

*Yuksel et al., "Stitch Meshes"*

*Wu et al., "Knittable Stitch Meshes"*

*Wu et al., "Stitch Meshing"*

そのなかでも Stich Meshes という手法が非常に面白く、後続の研究が活発に行われています。この手法では、まず与えられたメッシュに対して、どこからどの方向で編んでいくかを指定します。その情報に基づいて、真ん中の画像にあるような高解像度の Stich Mesh を生成します。この Stich Mesh の各面には個別の糸の通し方が対応付けられています。こういったものをアサインするかというのは、ユーザはプリセットの中から選択することが出来ます。

また、拡張・改良された論文も以下のように多く発表されています。

*Narayanan et al., "Automatic Machine Knitting of 3D Meshes"*

*Narayanan et al., "Visual Knitting Machine Programming"*

*Hofmann et al., “KnitPicking Textures: Programming and Modifying Complex Knitted Textures for Machine and Hand Knitting”*

*Guo et al., “Representing Crochet with Stitch Meshes”*

Knittable Stitch Meshes は出力が実際に編めるものであるということが保証されていて、Stitch Meshing は任意の 3 次元の物体を、自動でニットモデルへと変換することが出来ます。コンピュータ・グラフィックスでは、特に映画やゲームにおいては、実際に編めるかというのはそれほど重要ではありません。ぱっと見、おかしいところがないければ十分です。また、編みが非常に細かく、皆さんが普段身に着けているような綿の生地であると、複数パーツを縫い合わせるので、高度な最適化手法を使って必ずしも編める、ということを保証してあげる必要はありません。また、産業用の編み機への出力ができるように拡張したものもあります。KnitSpeak は Stitch のパターンを記述する言語で、KnitPicking では KnitSpeak コンパイラによって、それを KnitGraph へと変換します。KnitGraph は有向グラフで、各ノードはループを表し、ノードを接続する矢印はループをどう通すかを表します。この中間表現で、模様を修正したりつなげたり、といった操作を行います。実際に編めるかどうかにも同時にチェックします。模様は一定のサイズを持っているので、指定された編み物のサイズによってそれが切断されたりしますし、また、レイアウトによっては編めなくなることがあるのは想像に難くありません。最後にグラフから、編み機のためのコードを出力します。手編み用の指示を得るには KnitGraph を逆コンパイルします。また、Guo らの論文では Stitch Meshes でかぎ針編みを扱えるようにしています。

実際に編み物を作る場合、「編み」のパターンを入力しても出力結果が予想したものと違って見えるものになることがあります。これは、糸の引っ張り具合など様々な要因に左右されるためですが、パターンを入力したのち、糸レベルでシミュレーションすることで、実物と近い結果を得ることが出来ます。衣服全体を糸レベルでシミュレーションするのは非常にコストがかかりますが、最近では、編み物で繰り返し現れるひとまとまりの小さなパッチ単位でシミュレーションする方法が提案されています。

*Leaf et al., “Interactive Design of Periodic Yarn-Level Cloth Patterns”*

この論文ではパッチ単位の処理と GPU による高速化によって、結果をインタラクティブに表示することが出来ます。

## 質感

布の見え方に関する研究の概要をまとめた文献があります。

*Castillo et al., "Recent Advances in Fabric Appearance Reproduction"*

交差判定などはカバーされておらず、どうやってレンダリングするのか、といった部分に関しては別の文献にて勉強する必要があるかと思います。また、各技術の細部については触れられておりません。

質感を考える場合、どのレベル(布全体、糸(N-ply yarn)、繊維)で考えるかが非常に重要です。現在はコンピュータの性能が高く、メモリも安価となったので、これまで不可能であった繊維レベルで交差判定や光の散乱の計算も行えるようになってきました。しかし実際には、目的や計算資源に応じて、布を適切なもの、面やポリウムで近似する必要があります。また糸単位で考える場合でも、繊維まで見せる必要があるのか、より糸まで見えればよいのか、など適切なレベルを選択する必要があります。リアルな画像を生成するためには適切な形状の選択とそれに適した光の散乱モデルの組み合わせが鍵となります。面では BRDF、ポリウムでは位相関数、チューブでは BCSDf を用います。

面	ポリゴン、パラメトリック曲面など	BSDF
ポリウム	OpenVDB などグリッド	Phase Function
チューブ	球+円錐など	BCSDF、BSDF

これまではポリゴン(主に三角形)からなるメッシュで布を近似することがほとんどでした。ポリゴンで表現する場合には BSDF という関数とセットで使用するようになります。BSDF は Bidirectional scattering distribution function の略で光が Surface に当たった時にどう反射したり、透過していったりするかをつかさどるものになります。ポリゴンと BSDF による表現は遠景では十分ですが、近景では説得力のある画像を生成することができません。近景であると、糸による凹凸が表現できませんし、シルエットは実際の布のように複雑にならず、ぱさっとした曲線や直線になってしまいます。

*Irawan and Marschner, "Specular Reflection from Woven Cloth"*

は織られた布の光沢をモデル化していて、反射による光沢が布の表現で重要だと主張しています。シャドウイング、マスキングといったものは考慮されていないため、浅い角度で見た場合、実物と異なり暗くならない部分があります。

また Sadeghi らによる BSDF も同じように織りを考慮しています。

*Sadeghi et al., "A Practical Microcylinder Appearance Model for Cloth Rendering"*

*Nelson et al., "Practical Offline Rendering of Woven Cloth"*

経糸・緯糸が見る角度によって、どのようにお互いを遮蔽するかといったことを考慮に入れているので少し複雑な見た目を再現できます。後続の Nelson らの論文ではそれをさらに使いやすくしており、2016 年のものですがその当時 IKEA で使われていた様です。織りを考慮しているのはよいですが、先のものと同様に、やはり出力がどうしても金属のシートのような絵ばかりになってしまうところが残念なところです。この辺りがポリゴンと BSDF による表現の限界でしょう。

*Estevez and Kulla, "Production Friendly Microfacet Sheen BRDF"*

こちらは同じ BSDF でも少し異なったものです。先に挙げた BSDF は糸の光沢が取り扱いの対象であったのに対し、こちらは毛羽立ち、ポリゴンから垂直に生えた毛、による光の散乱が計算の対象になっています。

*Montazeri et al., "A Practical Ply-Based Appearance Model of Woven Fabrics"*

この手法も BSDF を用いていますが、論文中では PLY-BSDF と呼ばれていて、糸に適用します。こちらは商用ソフトウェア、Keyshot に搭載されている RealCloth という機能で使われているものです。使われている BSDF 自体は新しいものではなく、GGX、Lambertian、Lommel-Seeliger といわれる 3 つの標準的なモデルを組み合わせています。繊維レベルの細かい凹凸はテクスチャマップで(Normal Map)で再現します。繊維単位で BCSDf をアサインしても実際の布の質感にマッチさせるのが大変という主張がなされていますが、マッチしない原因として、交差判定の精度など様々なものが考えられるため、繊維単位で BCSDf をアサインすること自体が悪いとも思えません。

また、ニットなどは高解像度のポリウムとして扱うこともあります。

*Jakob et al., "A radiative transfer framework for rendering materials with anisotropic structure"*

十分リアルなものが生成できるがこちらでも近景まで正確に描こうとするとデータは大きくなります。ポリウムを扱う場合は Phase Function という BSDF のポリウム版といえるものを使って計算を行います。ポリウムデータを構造と光学的な特性を表すものとを分離しておけば、質感の編集がしやすくなります。また、ポリウムデータを異なる解像度(荒いものから細かいものまで何段階か)で保持しておけば、近景から遠景までアニメーションする場合などに、適切な LOD を選択することが出来るので、計算効率が良くなります。

最近ではコンピュータの性能の向上によって、毛を一本一本容易に扱うとできるようになってきましたが、この場合はたいいてい、毛をガラスでできたチューブのようなものと想定し質感の表現には BCSDf を用います。

*d'Eon et al., "An Energy-Conserving Hair Reflectance Model" (断面が円)*

*Khungurn and Marschner, "Azimuthal scattering from elliptical hair fibers" (断面が楕円)*

*Yan et al., "Physically-Accurate Fur Reflectance: Modeling, Measurement and Rendering" (2重)*

BCSDf は bidirectional curve scattering distribution の略で、BSDF のカーブ版といえるもので、究極には繊維一本一本に BCSDf を適応し、複数の繊維を紡いで糸を作り、織ったり編んだりすればよいわけです。通常、モデルを簡素化するため、断面は円であったり、楕円であったりと、単純な形状を仮定しますが、動物の毛用に提案されたモデルでは2重になったチューブを仮定するものもあり、動物由来の繊維を表現するのに妥当だと考えられます。ただし、Forensic Science の資料を見ると、動物の毛は非常に複雑な構造をもったものが多いこともわかり、どの動物の毛で作られた糸なのか、使用するモデルは適切か、を確認すべきです。

繊維レベルで光の散乱を計算した場合、実物との乖離が大きくなってしまうのは、繊維に適応した光の散乱モデルが単純すぎるためだと考えられます。

*Aliaga et al., "An Appearance Model for Textile Fibers"*

この論文では繊維の断面が複雑な形状であるという事実に着目して、実際に測定したデータをテーブルとして保持して BCSDf として利用します。特に植物由来の繊維の

断面が円形とかけ離れており、人口繊維や動物由来のものは割と円に近いようです。コットンは普段皆さんが着用するものの大部分を占めていますから、この違いは無視できません。測定されたデータは複雑なので単純な解析モデルのフィットはあきらめています。また、測定データは著者に連絡することでもらえるようですが、商用利用が出来ません。<http://giga.cps.unizar.es/~ajarabo/pubs/clothEGSR17/data/#downloads> またほとんどのモデルは、チューブが局所的に曲がっていないということを仮定して、言い換えれば円柱を想定して、導出されています。チューブの半径に対して曲率半径が大きい場合には、そもそものモデルも不適切である、と考えられます。

さらに最近では、細い毛や繊維であられる構造色も扱えるモデルが提案されています。

*Xia et al., "A Wave Optics Based Fiber Scattering Model"*

ホログラフィック反射生地というのはありますが、こういった現象を逆に利用して、カラフルではあるけれどももう少し上品な布などが作れるかもしれません。また、この論文では断面を離散化して、境界要素法をもちいるので、断面が円ではない繊維にも対応できるのが実は大きな利点です。

織りや編みといった糸の上下関係以外にも質感に影響を与えるものがあります。

*Montazeri et al., "Mechanics-Aware Modeling of Cloth Appearance"*

この論文では引っ張り具合によって、光沢が増すといった現象を再現しています。糸が引っ張られると、当然びんと張った状態になり、糸は見かけ細くなります。それによって光が向こうへ抜ける割合が多くなりますし、また糸や繊維の向きがそろうことで光沢が増します。

他にも単純な光の散乱モデルや、織りや編みといった構造以外でも見た目を左右するものがたくさんあります。ある波長を吸収して、別の波長を出力するといったものは、RGB 3色しか扱わないレンダリングでは不十分で Spectral Rendering が必要となります。また、経年劣化をシミュレーションする加工や機能を上げるための加工によっても当然生地の見え方が変わってきます。

## さいごに

昔は動物のレンダリングが難しいとされていました。しかし、光の散乱に加え、形状が見た目を大きく左右するため、布はそれよりも難しく奥が深いです。実際に製造できるかという制約のもと、少ない工数で容易に望まれる見た目となるような形状を生成する手法や、光の散乱を直感的に制御するための手法の登場が望まれます。コンピュータ・グラフィックスにおいては、扱う対象が必ずしも実際に織れたり編めたりしなくてもよいので、そういった意味では表現の自由度は高いです。





「マス・フォア・インダストリ研究」シリーズ刊行にあたり

本シリーズは、平成 23 年 4 月に設立された九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 (IMI) が、平成 25 年 4 月に共同利用・共同研究拠点「産業数学の先進的・基礎的共同研究拠点」として、文部科学大臣より認定を受けたことにともない刊行するものである。本シリーズでは、主として、マス・フォア・インダストリに関する研究集会の会議録、共同研究の成果報告等を出版する。各巻はマス・フォア・インダストリの最新の研究成果に加え、その新たな視点からのサーベイ及びレビューなども収録し、マス・フォア・インダストリの展開に資するものとする。

平成 30 年 10 月  
マス・フォア・インダストリ研究所  
所長 佐伯 修

## 数理的生成手法による CG とデジタルファブリケーション

マス・フォア・インダストリ研究 No.22, IMI, 九州大学

ISSN 2188-286X

発行日 2021 年 3 月 15 日

編集 巴山竜来, 中丸 啓, 大垣真二

発行 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

〒819-0395 福岡市西区元岡 744

九州大学数理・IMI 事務室

TEL 092-802-4402 FAX 092-802-4405

URL <https://www.imi.kyushu-u.ac.jp/>

印刷 城島印刷株式会社

〒810-0012 福岡市中央区白金 2 丁目 9 番 6 号

TEL 092-531-7102 FAX 092-524-4411

## シリーズ既刊

Issue	Author / Editor	Title	Published
マス・フォア・インダストリ 研究 No.1	穴田 啓晃 安田 貴徳 Xavier Dahan 櫻井 幸一	Functional Encryption as a Social Infrastructure and Its Realization by Elliptic Curves and Lattices	26 February 2015
マス・フォア・インダストリ 研究 No.2	滝口 孝志 藤原 宏志	Collaboration Between Theory and Practice in Inverse Problems	12 March 2015
マス・フォア・インダストリ 研究 No.3	笈 三郎	非線形数理モデルの諸相：連続，離散，超離散， その先 (Various aspects of nonlinear mathematical models : continuous, discrete, ultra-discrete, and beyond )	24 March 2015
マス・フォア・インダストリ 研究 No.4	穴田 啓晃 安田 貴徳 櫻井 幸一 寺西 勇	Next-generation Cryptography for Privacy Protection and Decentralized Control and Mathematical Structures to Support Techniques	29 January 2016
マス・フォア・インダストリ 研究 No.5	藤原 宏志 滝口 孝志	Mathematical Backgrounds and Future Progress of Practical Inverse Problems	1 March 2016
マス・フォア・インダストリ 研究 No.6	松谷 茂樹 佐伯 修 中川 淳一 上坂 正晃 濱田 裕康	結晶のらせん転位の数理	10 January 2017
マス・フォア・インダストリ 研究 No.7	滝口 孝志 藤原 宏志	Collaboration among mathematics, engineering and industry on various problems in infrastructure and environment	1 March 2017
マス・フォア・インダストリ 研究 No.8	藤原 宏志 滝口 孝志	Practical inverse problems based on interdisciplinary and industry-academia collaboration	20 February 2018
マス・フォア・インダストリ 研究 No.9	阿部 拓郎 高島 克幸 縫田 光司 安田 雅哉	代数的手法による数理暗号解析 Workshop on analysis of mathematical cryptography via algebraic methods	1 March 2018
マス・フォア・インダストリ 研究 No.10	阿部 拓郎 落合 啓之 高島 克幸 縫田 光司 安田 雅哉	量子情報社会に向けた数理的アプローチ Mathematical approach for quantum information society	26 December 2018

Issue	Author / Editor	Title	Published
マス・フォア・インダストリ 研究 No.11	松谷 茂樹 佐伯 修 中川 淳一 濱田 裕康 上坂 正晃	結晶転位の先進数理解析 Advanced Mathematical Investigation for Dislocations	7 January 2019
マス・フォア・インダストリ 研究 No.12	滝口 孝志	Non-destructive inspection for concrete structures and related topics	13 February 2019
マス・フォア・インダストリ 研究 No.13	宇波 耕一 長野 智絵 吉岡 秀和 田上 大助 白井 朋之	数理農学における時系列データのモデル化と解析 Modeling and Analysis of Time Series Data in Math- Agro Sciences	28 February 2019
マス・フォア・インダストリ 研究 No.14	佐久間 弘文 大津 元一 小嶋 泉 福本 康秀 山本 昌宏 納谷 昌之	ドレスト光子に関する基礎的数理解析	18 March 2019
マス・フォア・インダストリ 研究 No.15	松谷 茂樹 佐伯 修 中川 淳一 濱田 裕康 富安 亮子	結晶の界面，転位，構造の先進数理解析	2 December 2019
マス・フォア・インダストリ 研究 No.16	Takuro Abe Yasuhiko Ikematsu Koji Nuida Yutaka Shikano Katsuyuki Takashima Masaya Yasuda	Quantum computation, post-quantum cryptography and quantum codes	17 January 2020
マス・フォア・インダストリ 研究 No.17	河村 彰星 津曲 紀宏 西澤 弘毅 溝口 佳寛	代数・論理・幾何と情報科学—理論から実世界への 展開	10 February 2020
マス・フォア・インダストリ 研究 No.18	Takashi Takiguchi	New technologies for non-destructive and non- invasive inspections and their applications	21 February 2020
マス・フォア・インダストリ 研究 No.19	Hirofumi Sakuma Motoichi Ohtsu Masayuki Naya Izumi Ojima Yasuhide Fukumoto	Basic mathematical studies on dressed photon phenomena	19 March 2020

マス・フォア・インダストリ  
研究 No.20

松谷 茂樹  
井上 和俊  
加葉田雄太朗  
佐伯 修  
垂水 竜一  
内藤 久資  
中川 淳一  
濱田 裕康

材料科学における幾何と代数 I

24 November 2020

マス・フォア・インダストリ  
研究 No.21

Daisuke Sakurai  
Shigeo Takahashi  
Naoki Hamada  
Osamu Saeki  
Hamish Carr  
Takahiro Yamamoto

Fiber Topology Meets Applications

10 March 2021



Institute of Mathematics for Industry  
Kyushu University

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

〒819-0395 福岡市西区元岡744

<https://www.imi.kyushu-u.ac.jp>