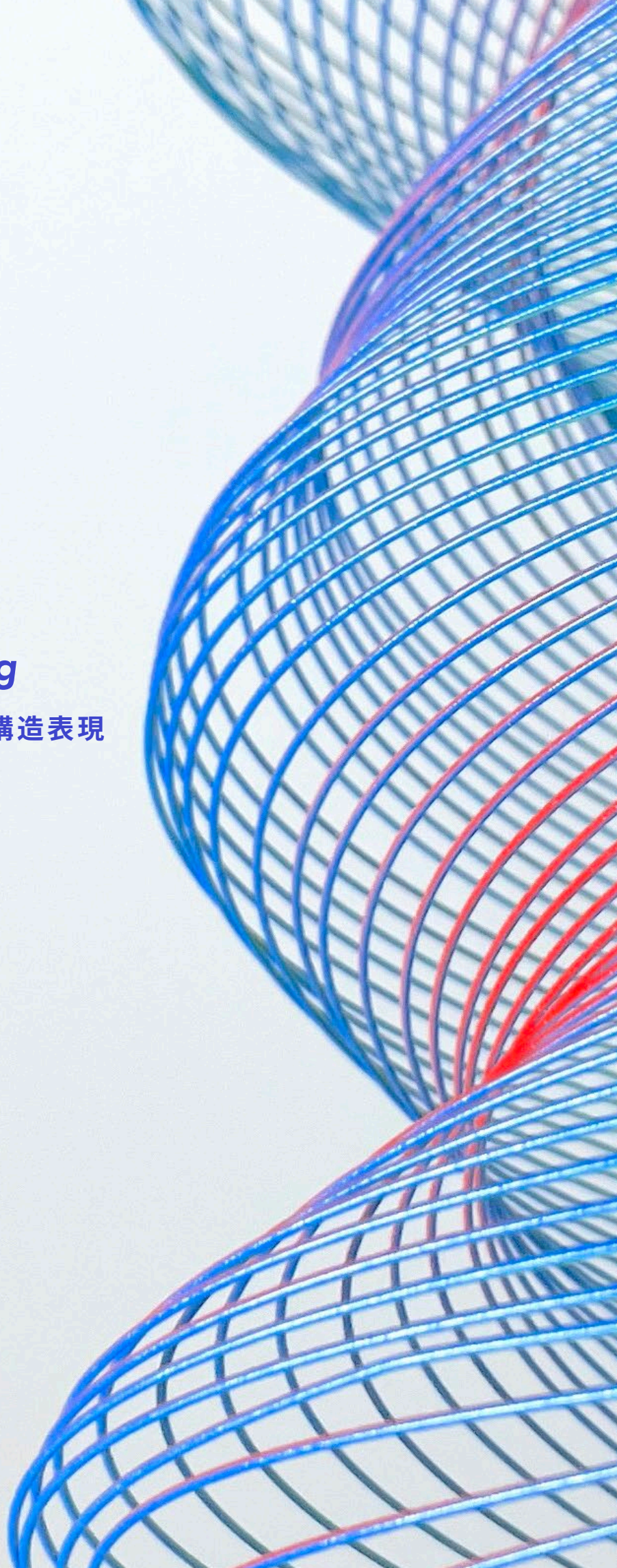


Catenary Printing

樹脂が織りなす揺れる曲面構造表現

2021 年度 学士論文

環境情報学部 木下里奈





Contents

1.	Introduction	p.5
2.	Spatial Printing	p.6
2.1.	Related Works	p.7
2.1.1.	Supportless Printing Methods	
2.1.2.	Faster Printing Methods	
2.1.3.	Errors as Methods	
2.1.4.	Speed Based Design	
2.1.5.	Scalable Design	
2.1.6.	Voxel Based Design	
2.2.	My Experiments	p.14
2.2.1.	Falling Stems	
2.2.2.	Study of Truss-like Structures	
2.2.3.	Study of Bridging Structures	
2.2.4.	Study of Draping Structures	
2.3.	Chapter Conclusion	p.19
3.	Catenary Printing	p.20
3.1.	Research of Structure	p.21
3.1.1.	Catenary and Funicular Arches	
3.1.2.	Architecture - Compression	
3.1.3.	Architecture - Tension	
3.1.4.	Installation	
3.2.	Research of Catenary Printing	p.26
3.2.1.	曲線の制御	
3.2.2.	柔らかさ	
3.2.3.	複雑な曲面 色の濃淡	
3.2.4.	自立	
3.2.5.	透光性	
3.3.	Method of Catenary Printing	p.32
3.3.1.	かさ上げ台	
3.3.2.	長さの制御	
3.3.3.	吐出量とスピード	
3.3.4.	冷却	
3.3.5.	干渉・糸引き防止	
3.3.6.	ブレ吐出	
3.4.	Example of a Printing Path	p.34
4.	Catenary Printing Works	p.37
4.1.	Fluctuation	p.39
4.1.1.	Fabrication	
4.1.2.	Reflection	
4.2.	滴脈の間	p.43
4.2.1.	Concept	
4.2.2.	Fabrication	
4.2.3.	Observation	
4.2.4.	Reflection	
5.	Conclusion	p.55



Fig. 01: 積層方式によって作られた靴 xCloud Sandals [01]



Fig. 02: G-code の自作によりテクスチャと色の制御をした構造

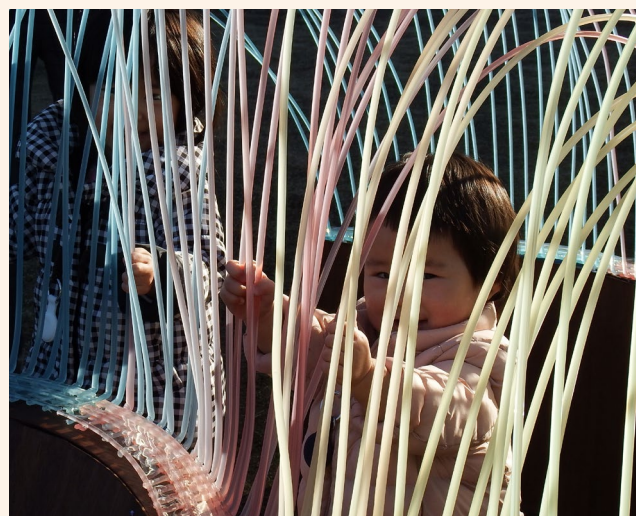


Fig. 03: Spatial Printing により揺れる特性を付与された構造

Introduction

Fused Filament Fabrication (FFF) 方式の 3D プリンティングでは、樹脂の糸を吐出しながらノズルを動かし、線を最小単位として形を造形していく。3D プリンターの軌道(ツールパスと呼ぶ)の制御により 3D プリンティングではさまざまな表現手法が生み出されてきた。

FFF 方式の 3D プリンティングで代表的なのは積層方式という樹脂の糸を層状に積み上げていく手法である (Fig.01 参照)。一般的に積層方式でプリントするには、スライサーというソフトウェアを使用して STL などの 3D メッシュモデルからツールパスデータである G-code を生成し、造形をする。

3D プリンティングには G-code を自作するアプローチが存在する。これにより手法の設計からの関与が可能となる。3D プリンターをどう動かすのか、その動かし方によりアウトプットにどのような独自の特性を与えられるのかを考慮したデザインが重要となる。例えば Fig.02 のような、テクスチャや色を制御した手法が実現できる。

さらには積層する制約から解かれ、空中に線を描画するアプローチも存在する。積層方式ではツールパスにより描かれる線は線同士が融合し立体の一部となるのに対し、このアプローチではツールパス自体が直接造形物の形状となる。本稿ではこのアプローチを Spatial Printing と呼ぶ。

Spatial Printing のアプローチをもとにさまざまな造形手法と設計手法が開発され、積層方式では付与できなかった特性を持つアウトプットが生み出されてきた。本稿ではまず、Spatial Printing によってどのような特徴を持つ構造物が造形されてきたのか事例をまとめた。次に、樹脂を垂らしながら造形する手法 Catenary Printing に着目し、手法の研究を行った。この研究をもとに Catenary Printing をするための設計手法を提案する。さらに、作品制作を通して、Catenary Printing の価値を模索する。

Spatial Printing

本章では Spatial Printing による関連事例とその特性、さらには、筆者が制作してきた試作を紹介する。

Related Works

Spatial Printing のさまざまな造形手法が開発されてきた。冷却により空中に線を描く技法や、ジェルを充填した空間でプリントする手法、さらには一般的なプリントではエラーとされる現象を造形手法に昇華した事例がある。

また、これら造形手法による造形自由度の向上により、さまざまな設計手法が開発された。

Supportless Printing Methods

Faster Printing Methods

Errors as Methods

の項では造形手法を、

Speed Based Design

Scalable Design

Voxel Based Design

の項では設計手法を紹介する。

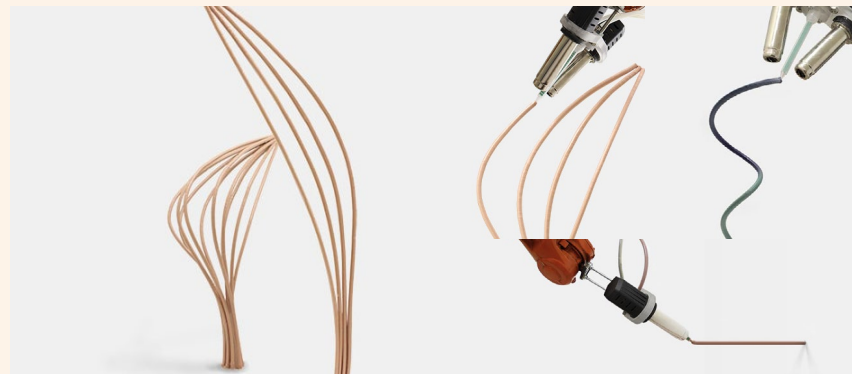
Supportless Printing Methods

通常の 3D プリンティングの造形プロセスでは、硬化前の材料が重力で垂れないように支えるサポート材を造形する場合がある。この構造物は造形後に除去するもので、必要な範囲が大きくなるほど材料と造形時間を余分に費やすことになる。Neri Oxman が提唱する "Freeform Printing" をはじめとした空中に自由な曲線を描画するプリント手法により、サポートレスで無駄の少ない造形が可能となる。



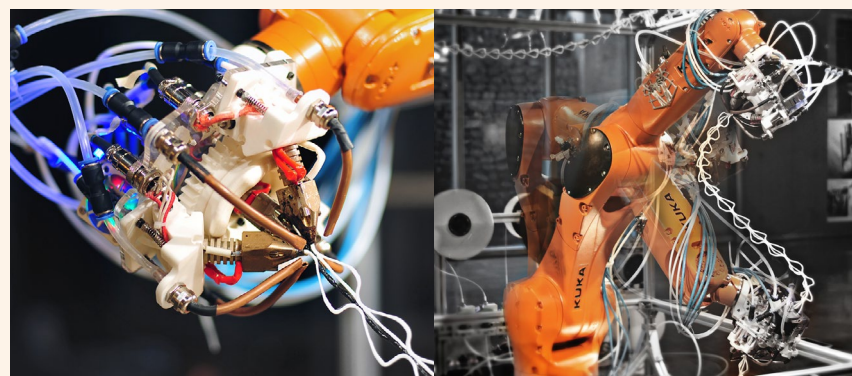
Freeform Printing [02]
by Neri Oxman et al.
2013

“Freeform Printing” の概念実証として、吐出するとすぐに材料が硬化するように冷却ユニットが取り付けられたノズルで制作した試作と、径の異なる複数の線を同時に吐出するノズルで制作した試作が発表された。



Materal (MX3D Resin) [03] [04]
by IAAC Joris Laarman lab
2013

熱硬化性樹脂を用いた 3D プリント手法。先端にヒーターを取り付けることで硬化が早まり、空中に曲線を描くことが可能になる。また、水平な面ではない壁面にもプリントすることが可能である。色の制御も行っている。

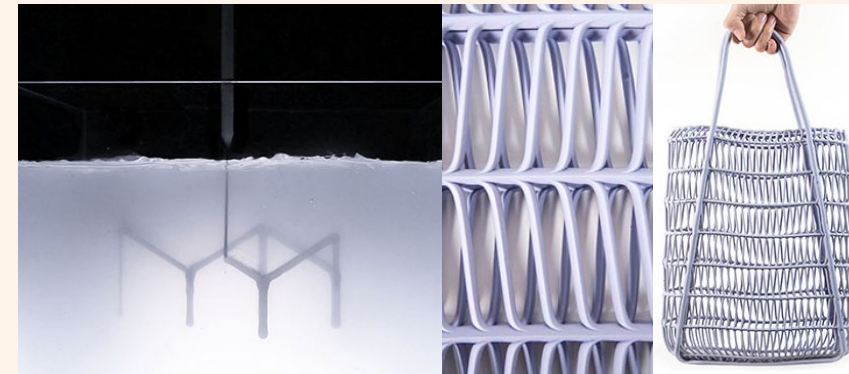


Hyperbolic Extrusion [05]
by School of Architecture and Urban Planning,
Tongji University
2014

強度のある蜘蛛の糸の構造を参考に構築した造形手法。軸となる中心のパスとそれを覆う波状のパスにより構造が作られる。ABS で造形している。

Faster Printing Methods

ジェルや粉などを充填した重力の影響を受けにくい空間の中でプリントすることで、充填物がサポートの役割を担い、材料の硬化を待たずにプリントすることが可能になる造形手法が開発された。空中でプリントするよりも自由度が高く、造形が早い。しかし造形範囲は充填物を入れられる容器の大きさに制限されてしまう。



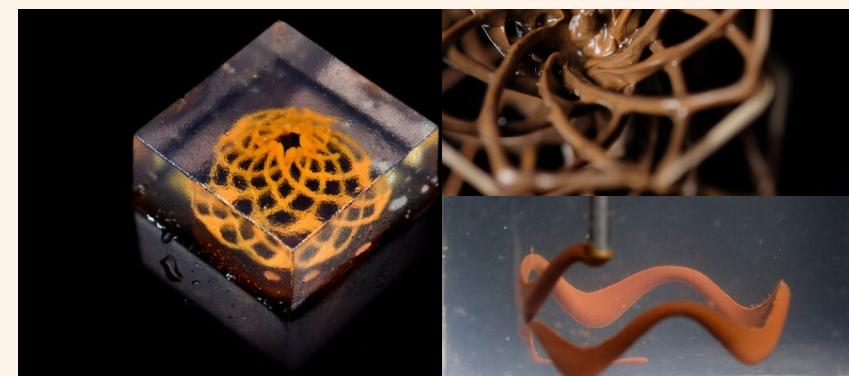
Rapid Liquid Printing [06] [07]
by MIT Self Assembly Lab
2017

Rapid Liquid Printing はジェル空間の中で樹脂を浮かせてプリントする技法である。ジェルの中には重力の影響を受けにくいため、空中よりも早い造形が可能である。さらには線の太さを変動させることも可能となっている。応用事例として、メッシュ状のカバンなどを制作している。



Liquid Printed Metal [08]
by MIT Self Assembly Lab
2019

Rapid Liquid Printing と同ラボにて、粉を充填した空間の中で溶けた金属をプリントすることで Spatial Printing をする手法を開発した。



Freeform Fabrication of Fluidic Edible Materials [09]
by Carnegie Mellon University Morphing Matter Lab
2020-2021

食品プリンティングの分野でも、ジェル空間による Spatial Printing の研究がされている。

Errors as Methods

3D プリンティングで起こるエラーを再現し、あえて造形手法として用いる事例がある。以下の作品は、樹脂が垂れてしまう現象を利用したものである。ランダム感のある意匠を生み出している。



Spongebob Flower Stool [10]
by Aimee Yuehui Lin
2018

綺麗に造形される面と造形が乱れ樹脂が垂れる面を持つ椅子。6軸のロボットアームを使用しPETGのペレットを材料に制作される。4つのピースに分けて造形されており、サンゴ礁を想起させる形状が継手としての役割を果たす。



Atolla Table [11]
by Harry Anderson et al.
Year unknown

縦向きに置かれた板の上に樹脂を垂らして作った構造。ロボットアームを用いて造形している。サポートを造形せずに家具などの大型の造形をする手法を提案する。

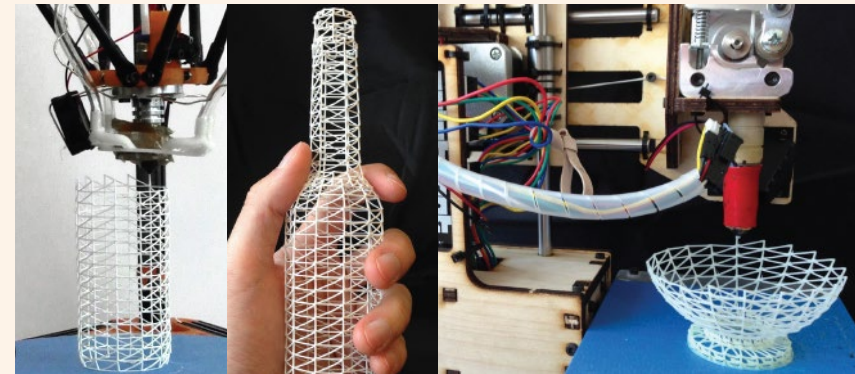


GCODE.Clay [12]
by Emerging Objects
2016

さまざまな種類の粘土を3Dプリントした事例。エラーを制御し新しい意匠を模索する。

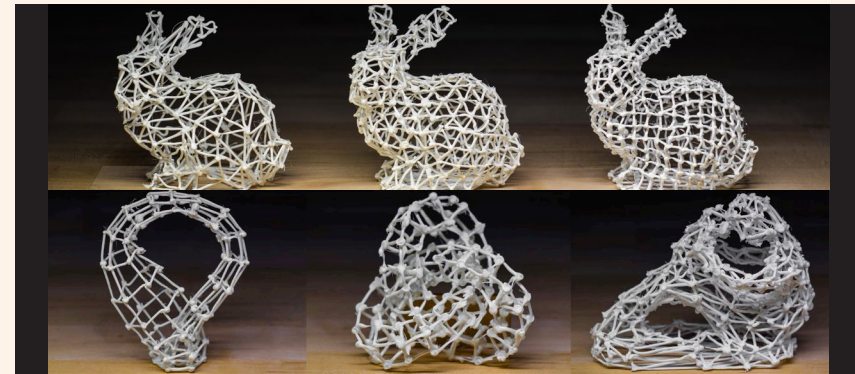
Speed Based Design

3D プリンティングはラピッドプロトタイプングツール(高速に試作物を作るツール)と呼ばれながらも、実際はある程度のスケールを造形するのに長い時間がかかってしまう。そこで、大まかな輪郭のみを空中に線状に描くことで、造形時間を大幅に短縮することが可能となる設計手法が提案される。



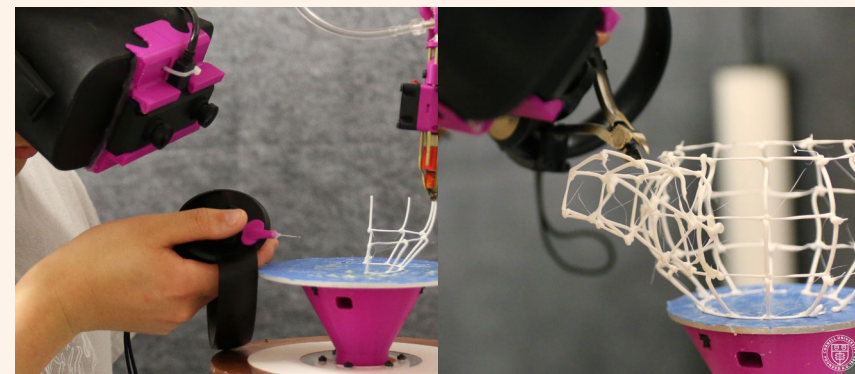
WirePrint [13]
by Stefanie Mueller et al.
2014

WirePrintでは、プロトタイプングのイテレーションを高速化させることを目的に、3Dモデルのおおまかな輪郭のみを空中で線状に描き造形時間を短縮する手法を提案している。



Printing Arbitrary Meshes with a 5DOF Wire-frame Printer [14]
by Rundong Wu et al.
2016

MuellerのWirePrintで提案されるプリントではプリントヘッドと造形物の干渉によりメッシュの形状が制限されている。そこで、自由な角度からノズルがアプローチできる5軸のプリンターを用いることで干渉を避け、より自由度の高いメッシュの造形が可能となる。

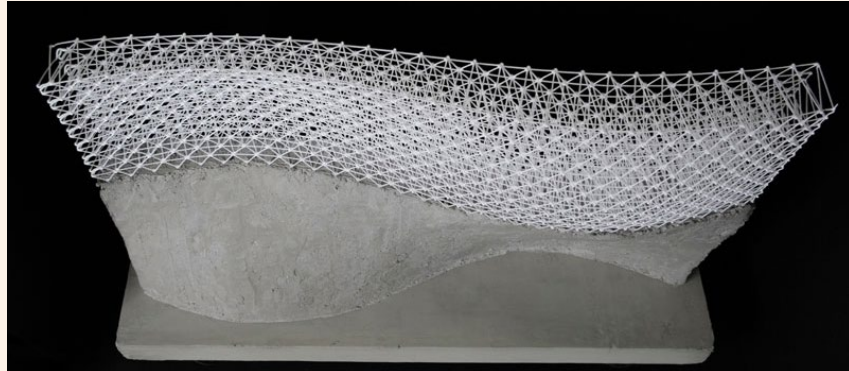


RoMA: Interactive Fabrication with Augmented Reality and a Robotic 3D Printer [15]
by Huaishu Peng et al.
2018

ARを用いて3Dモデルを設計し、リアルタイムに構造を造形する設計手法が提案される。Spatial Printingにより高速に造形ができるようになるからこそ実現する設計手法である。

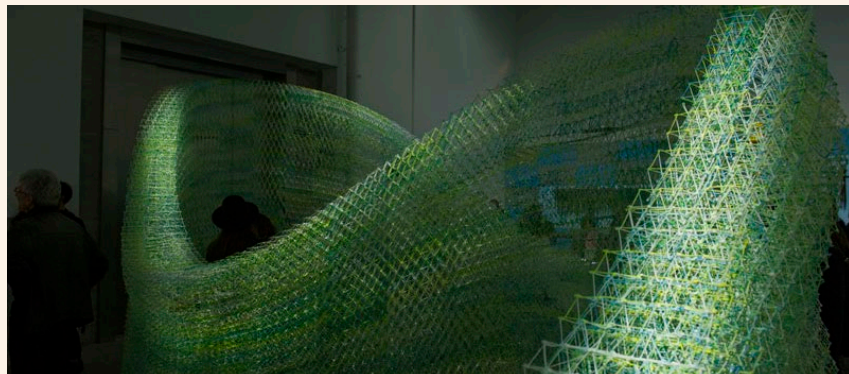
Scalable Design

Spatial Printing により、少ない材料で強度のある構造の設計が可能になる。非常に軽量であるため、多くの建築スケールの樹脂構造物は Spatial Printing によって設計されている。



Mesh Mould[16][17]
by ETH Zurich Gramazio Kohler Research
2012-2014

コンクリートを任意の形に成型するには型枠の製造と鉄筋等の補強材の設置が必要である。コスト削減のためにコンクリートの形状は単純化され、長所である形の自由度の高さが活かしきれていない現状がある。そこで型枠と補強材のどちらの役割も担う部材を Spatial Printing することでコストを削減し、自由度の高い形状を成型する。



Iridescence Print[18][19]
by ETH Zurich Gramazio Kohler Research
2015

上の Mesh Mould で得た知見を発展させた世界初の大型 3D プリントインスタレーション。長さ 12m、高さは 1m ~ 2.8m、奥行き 0.25 ~ 0.5m ほどあるこのインスタレーションの重量はわずか 75kg であった。白、青、黄の顔料がまだらに混ざった自作フィラメントを用いて造形されている。

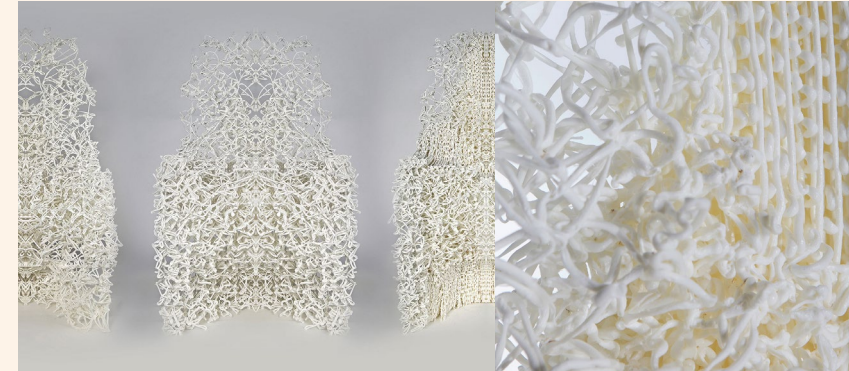


Flotsam and Jetsam[20][21]
by SHoP Architects, Branch Technology
2016

炭素繊維強化 ABS を材料に造形した構造。積層方式と比べ使用する材料が 1/20 以下である。3,000lbs(約 1360kg)の圧縮力に耐えられる構造となっている。

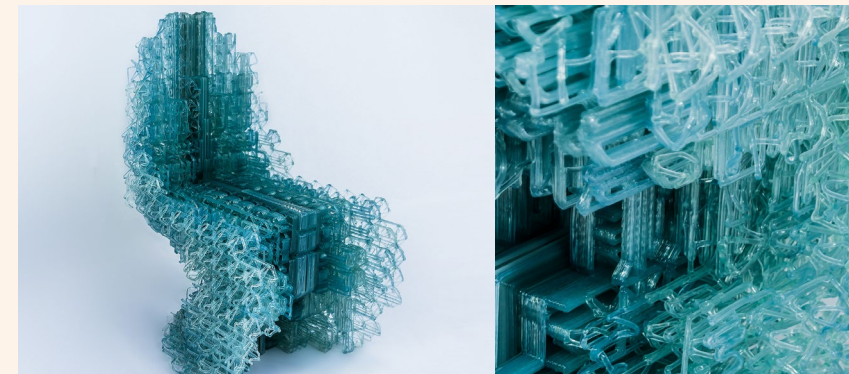
Voxel Based Design

Spatial Printing による複雑な内部構造を持った作品は、内部構造を表現可能なデータ形式のボクセルをベースに設計されることが多い。Spatial Printing のさまざまなパスの描き方によって立方体空間を埋めることで、異なる特性(強度、強度方向、透明度等)を持つボクセルが設計できる。これらの小さなボクセルを構成要素として組み合わせ複雑な構造物が作られる。



CurVoxles[22][23]
by Hyunchul Kwon et al.
2014 - 2015

一繋ぎりのベジェ曲線で構成された椅子。負荷のかかる箇所ではボクセルが八分空間に細分化され密度が高くなるよう設計される。また、3種類の径のノズルが一体化されたノズルを開発し、線の径を変化させられる手法も提案されている。



Voxel Chari V1.0 [24][25]
by Manuel Jiménez García et al.
2017

強度が必要な箇所では密度が高いボクセルが採用され、座面には柔らかい密度の低いボクセルが採用される。



Li-Quid[26]
by Alisa Andrasek et al.
2016

人体の 3D モデルに液体を浴びさせる流体シミュレーションの一瞬を切り取ったデータを 3D プリント椅子の意匠として応用した事例。液体の波の形状をボクセル化し、それぞれのボクセルには液体のベクトル方向の情報を保持させる。このベクトル方向値は、3D プリントパスに変換されると突起の向きとして反映される。

My Experiments

本節では、筆者がこれまで制作してきた、**Spatial Printing** により一般的なスライサーでは作れない特性を持つ試作を紹介する。



Falling Stems

環境の温度に応じて変形する作品。お湯を注ぐと線が萎れていくようにパラパラと垂れ下がる。

4本のフィラメントを任意の配合で混色可能なFFF方式プリンター**QuadFusion**を使用している。一本のパスの中で、熱で変形する材料から変形しない材料へとグラデーションに変化する。

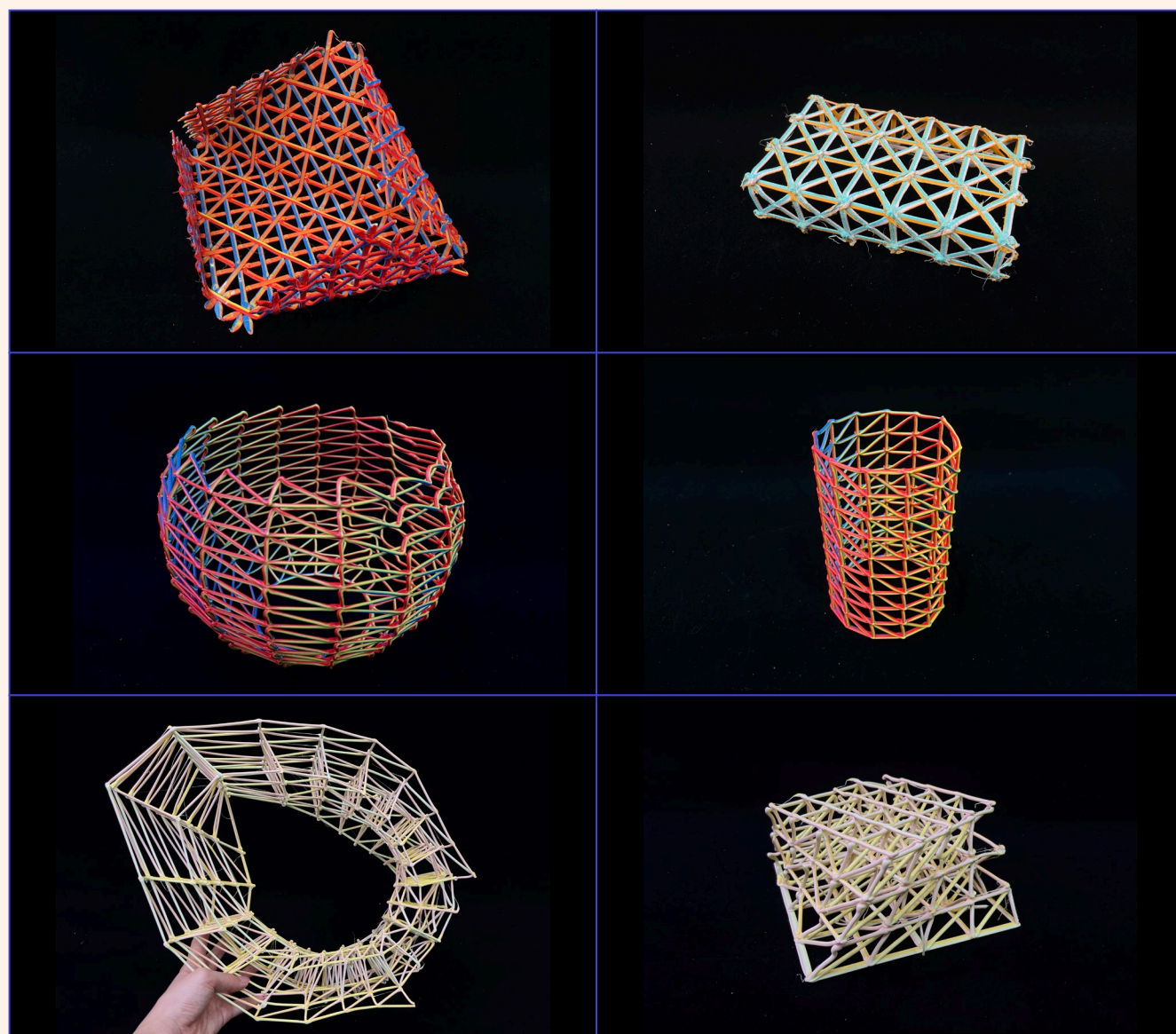


Fig.04: トラス構造のような Spatial Printing 3D プリント協力：株式会社光伸プランニング

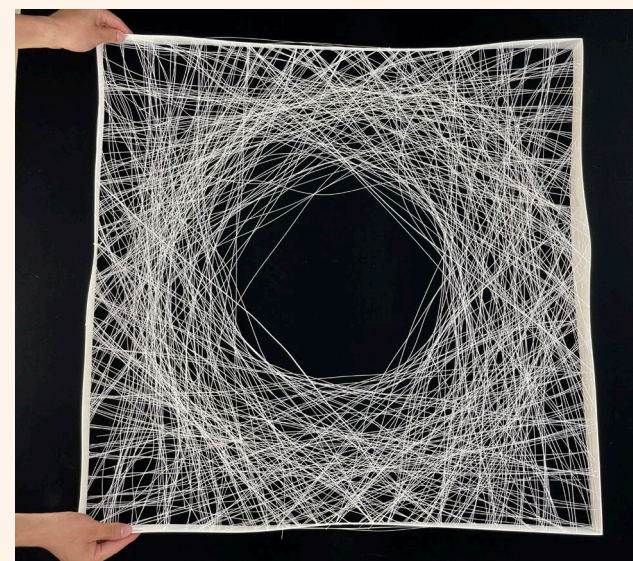
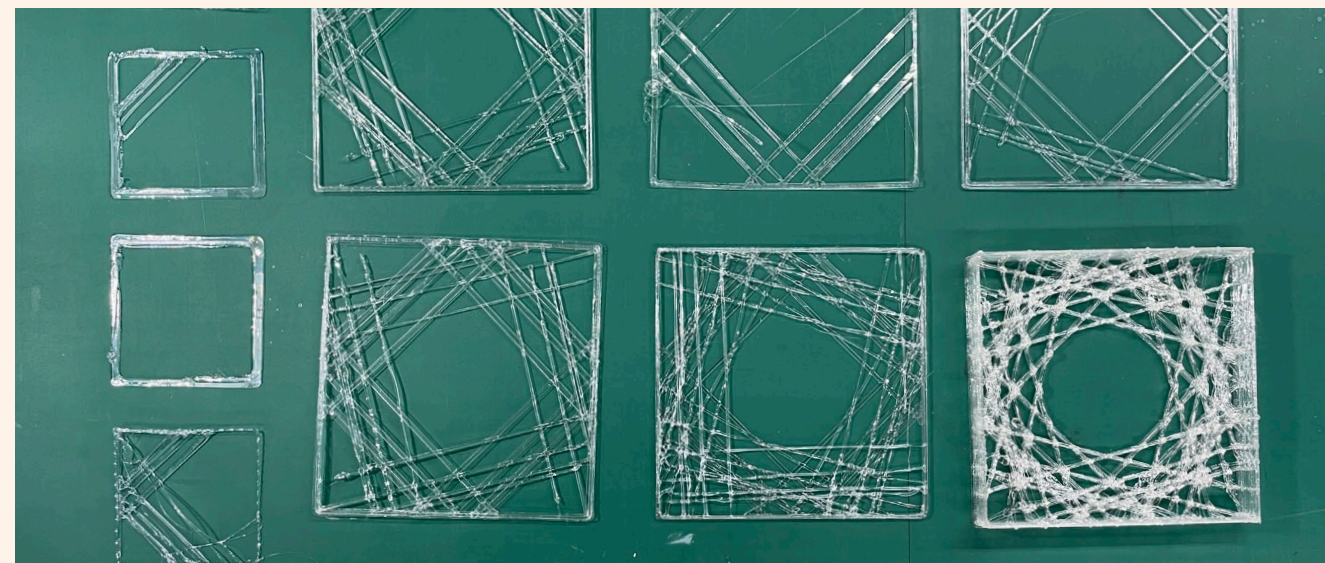
Study of Truss-like Structures

関連事例を参考にトラス構造のような強度のあるプリントを試作した。平面で造形したのちに、後処理で熱を加えて折り曲げられる構造を試作した(Fig.04 上段)。WirePrint[13]を参考に、外形だけをプリントする手法(Fig.04 の中段)や、p.12 で紹介した事例で見られる内部もトラス構造になっている試作(Fig.04 の上段)も行った。一般的な 3D プリンターで Spatial Printing をすると、機体と造形物が干渉してしまい造形ができない。そこで、Fig.05 のような長いノズルを使用し、干渉を避けた。

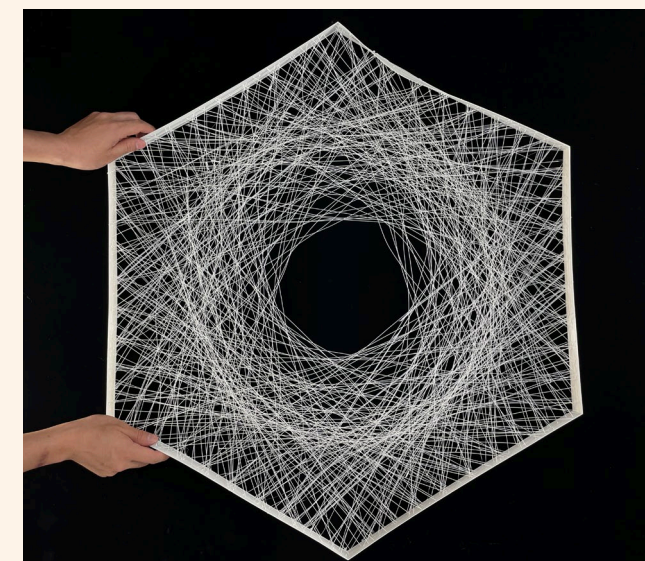


Fig.05: Spatial Print 用の長いノズル [27]

p.16, 17, 18 の試作群は株式会社光伸プランニングのご協力のもと制作している。

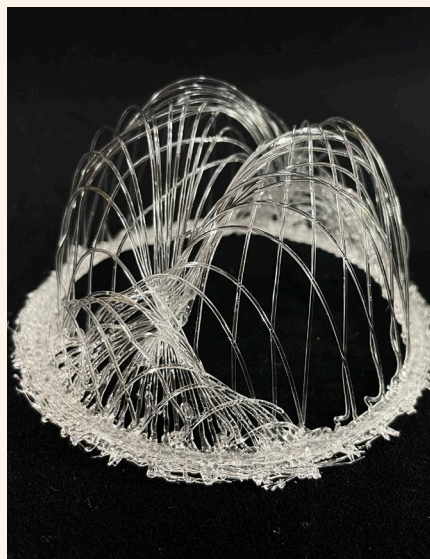
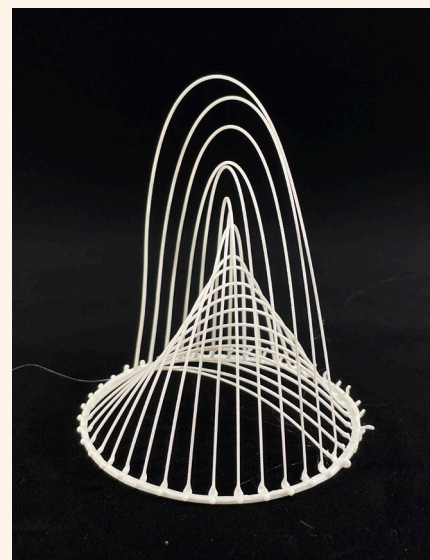
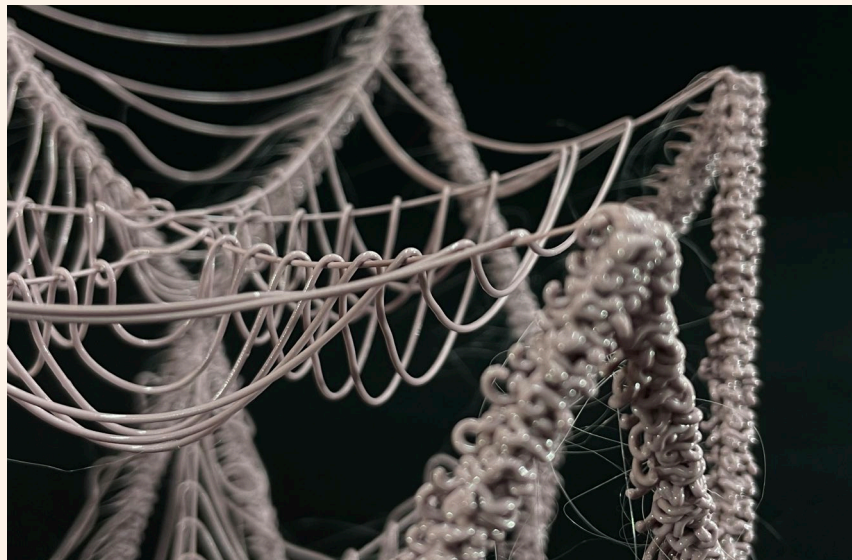


3D プリント協力：株式会社光伸プランニング



Study of Bridging Structures

パスが長距離ブリッジする構造を試作した。冷却をすることで 1m の長さがあっても橋渡しが可能であることがわかった。



3D プリント協力：株式会社光伸プランニング



Study of Draping Structures

樹脂を垂らしながら造形する構造を試作した。

樹脂を吐出する量を多くすることで垂れ下がる構造を作っている。

Chapter Conclusion

Spatial Printing の造形手法の関連事例は、2 種類に分類できる。1 種類目は線の完全なコントロールを試みる手法と、2 種類目は線の乱れや重力による影響に寛容な手法である。完全なコントロールを試みる手法には、さまざまな設計手法の提案がされてきた。造形の早いツールパスの設計手法(**Speed Based Design** 参照)や、軽量でありながらも強度のある大型構造物の設計手法(**Scalable Design** 参照)、さらにはボクセルの概念を用いた設計手法(**Voxel Based Design** 参照)が提案される。対して、線の乱れや重力による影響に寛容な手法を用いて作品は制作されるものの意匠にとどまる(**Errors as Methods** 参照)。

今回着目した樹脂を垂らしながら造形する手法は、2 種類目の線の乱れや重力による影響に寛容な手法に分類される。本研究では、樹脂を垂らす表現を用いて意匠にとどまらない価値を分析し、その価値を応用した設計手法を構築することを目的とする。

Catenary Printing

樹脂を垂らしながら造形する手法によって生まれる構造は、カテナリー曲線(以下、カテナリーと呼ぶ)に近い形状をしている。カテナリーとは重力が生み出す形で、紐の両端を持って垂らすとできる放物線のような曲線を指す。

カテナリーは力学的に安定しているという特徴があり、ガウディの建築をはじめとするさまざまな建築構造に応用されてきた。このような強度のある構造に近いものを作る点から探究の余地があると考える。樹脂を垂らしながら曲線を造形する手法を本論文では **Catenary Printing** と呼ぶ。

本章では、カテナリーの形状を持つ事例のリサーチ、**Catenary Printing** した構造の特徴、そして **Catenary Printing** の方法をまとめる。また、**Catenary Printing** の造形手法を用いて曲面を生み出すための設計システムを提案する。

Research of Structure

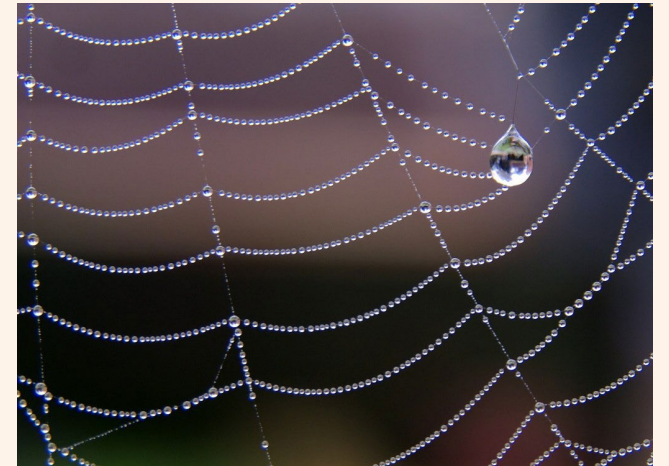


Fig.06: 自然界にあるカテナリー [28]

Catenary and Funicular Arches

カテナリーとは、紐の両端を持ったときに重力によって生まれる曲線の名前で、紐の引張力と重力が均衡し構造的に安定した形になっている。カテナリーを上下逆さにすると構造には引張力の代わりに圧縮力が作用するが、同様にひずみが少なく安定する。カテナリーは作用する力が軸方向の引張力であっても圧縮力であっても安定する合理的な形状である。

フニクラとは、この紐に重りを加えたときに生まれる形で、上下逆さにしても同じ箇所に同じ荷重がかかっている場合に安定するような形になっている。フニクラを作る逆さ吊り実験を行うことで高度な計算をしなくても最適な形状を求めることができるため、コンピューターが登場する以前からカテナリーやフニクラが建築などで応用されてきた。

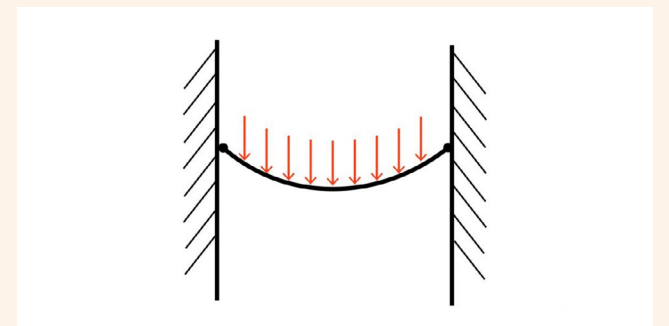


Fig.07: カテナリーにかかる重力 [29]

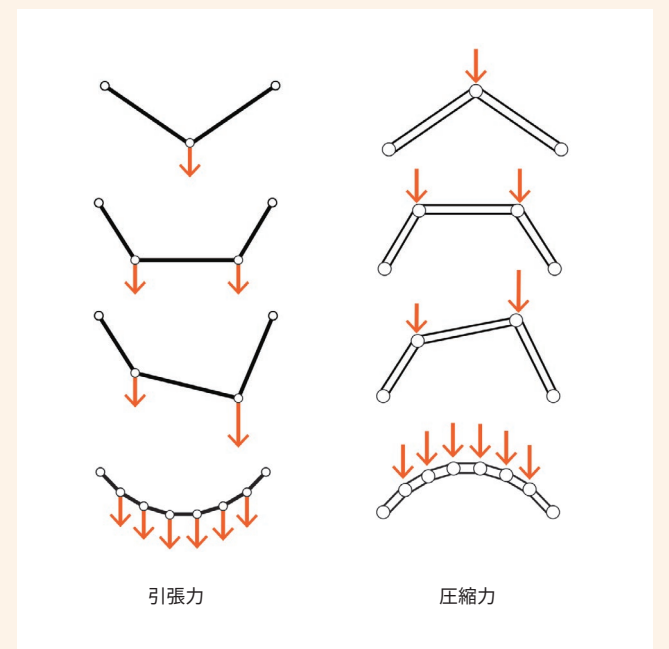


Fig.08: フニクラにかかる引張力と圧縮力 [29]

Architecture - Compression

フニクラの形を建築に応用した代表例が 19 世紀末から 20 世期頭のガウディの建築であった。ガウディは逆さ吊り実験によるフニクラの形を、サンタテレサ学院の連続するアーチ (Fig.09) やサグラダファミリアの天に向かってそびえ立つ樹木のような柱 (Fig.10) をはじめとするさまざまな構造に組み込んだ。Fig.11 はサグラダファミリアの三次元逆さ吊り実験の復元模型である [30]。

ガウディはカタルーニャの伝統材料の石とレンガの使用に拘った。石やレンガの組積造は圧縮には強いが、引っ張りや曲げに弱いという特徴がある。そこで、逆さ吊り実験により全て軸方向の圧縮力で荷重を伝達する合理的な形状を見つけ出し、設計に応用したことで、石やレンガなどの脆い材料でも高さのある空間を作り出すことを可能にした [31]。



Fig.09: サンタ・テレサ学院 [32]



Fig.10: サグラダファミリアの内部空間 筆者撮影



Fig.11: サグラダファミリアの逆さ吊り実験の復元模型 [33]



Fig.12: Ingalls Rink [34] [35]

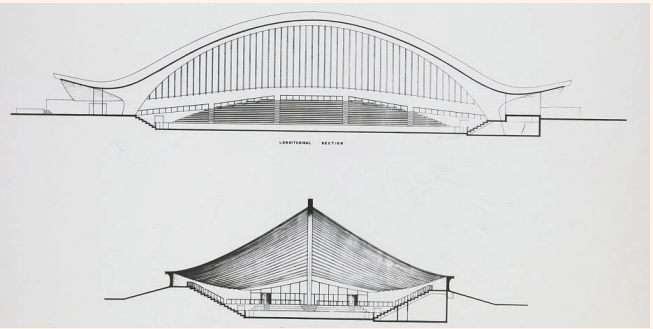


Fig.13: Washington Dulles International Airport [36] [37]

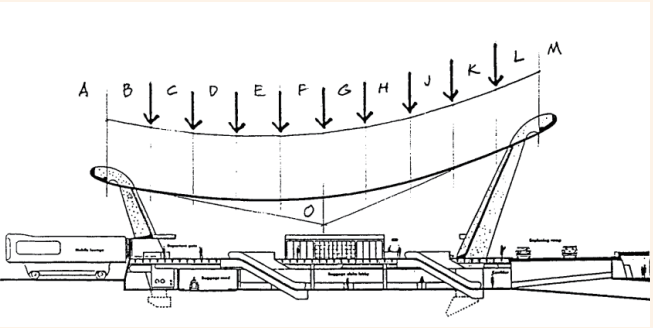


Fig.14: 国立代々木競技場 [38] [39]

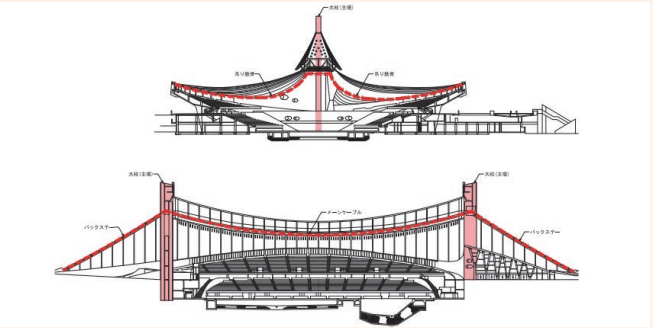


Fig.15: 瀬戸大橋 吊り橋の一例 [40]

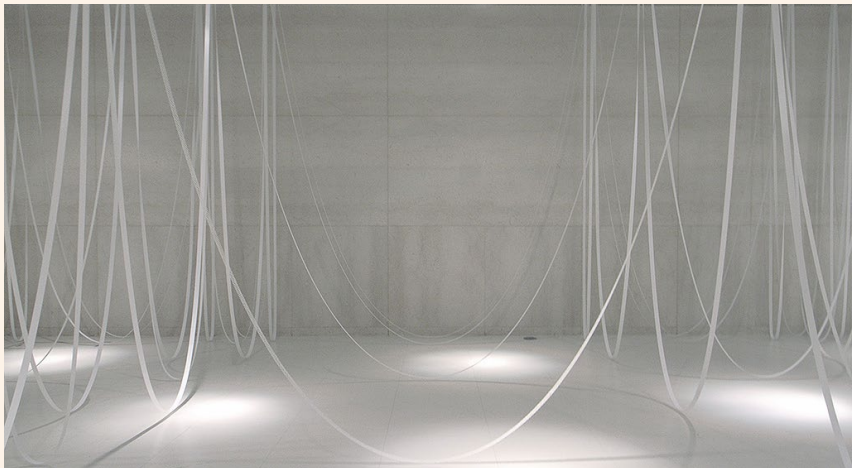
Architecture - Tension

20 世紀半ばには、フニクラの形をしている吊り橋の構造を建築に応用した吊り構造が建てられた。ワイヤーの引っ張り力への強さを活かした構造となっている。

国立競技場を建設する際に、競技観戦の邪魔となる障害物のない空間を作りたかった丹下健三は、柱を必要とせずに広い空間を生む吊り構造を採用した。

Installation

線に着目した建築家中村竜治は、展示空間やインスタレーションにカタナリーを好んで用いた。中村は、線にはコントロールしようとした線とされない線の2種類があると語る。建築ではたわみや反り、膨張や収縮をコントロールし直線を維持する。一方で中村はコントロールされない線を前向きに捉え作品を制作した [41]。その一部が次のカタナリー構造を持つ作品群である。

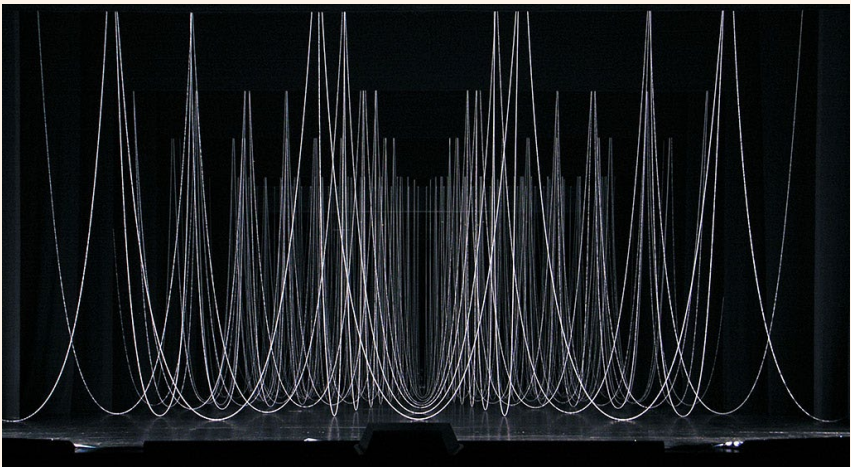


「散歩 - ミナ ペルホネンのリボンプロジェクト」
展 会場構成 [42]
2008 年

リボンの展示空間で、リボンを天井から吊るしカタナリーを作る。リボンをまたいで空間に立ち入る。

オペラ「ル・グラン・マカーブル」
舞台美術 [43]
2009 年

バトンに吊るされたモールリボンが目に見えない空気や重力を視覚化する。バトンを動かすことで舞台の場面が展開していく。



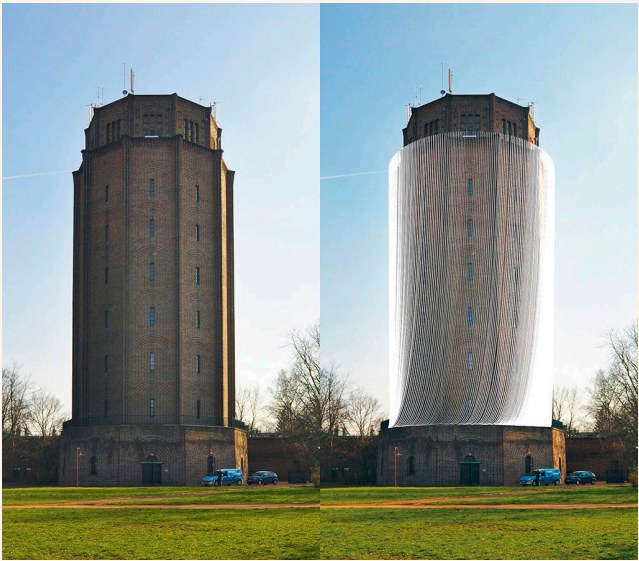
「CoSTUME NATIONAL : 25 Years」展
会場構成 [44]
2011 年

ファッションブランドの展示空間。リボンがブラインドのように振る舞い、見る角度によって展示物が見え隠れする。空調の風でリボンが揺れる。



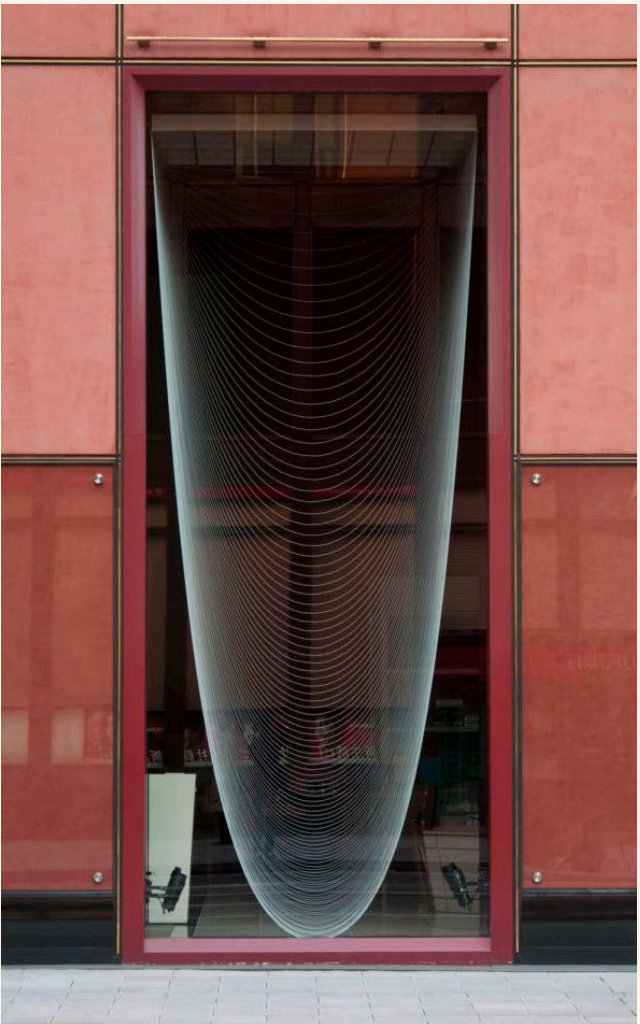
東京銀座資生堂ビル インスタレーション [46]
2014 年

小さなビーズで構成される大きなネックレスで作ったカタナリー。吊るす位置も前後にずらすことで3次曲面を作っている。



西武池袋本店 7 階休憩所 [45]
2010 年

天井から垂れ下がったベンチ。柔らかいビニールシートでできているため人の体重のかけ方によってさまざまな形に変形する。



ライフ [47]
2019 年

パウハウスにゆかりのある建築家が設計した高さ 33.85m の給水塔の装飾としてリボンを覆っている。

Research of Catenary Printing

本節ではカタナリープリントにどのような特徴が見られ、どのような設計手法に発展しうるのか可能性を述べる。

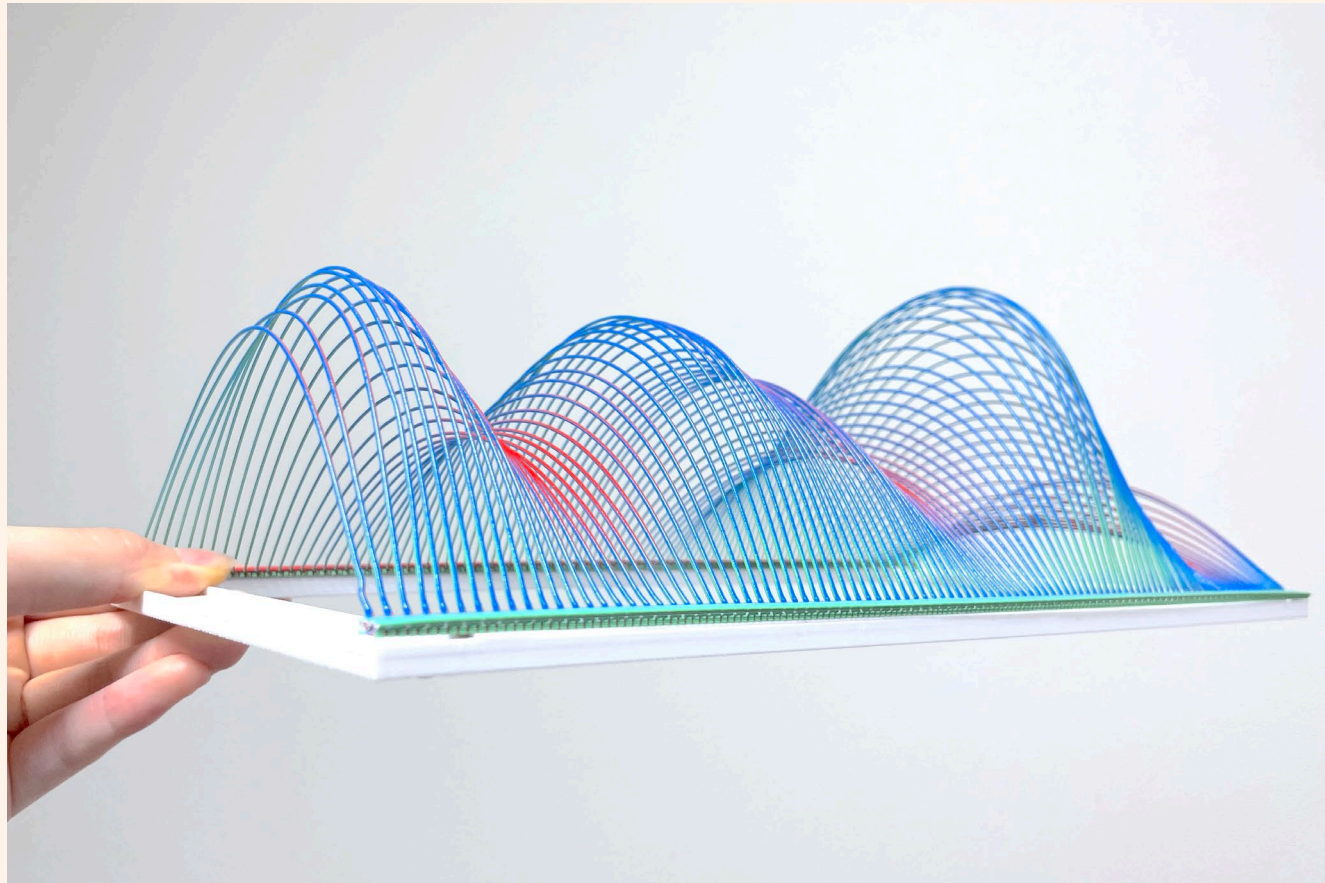
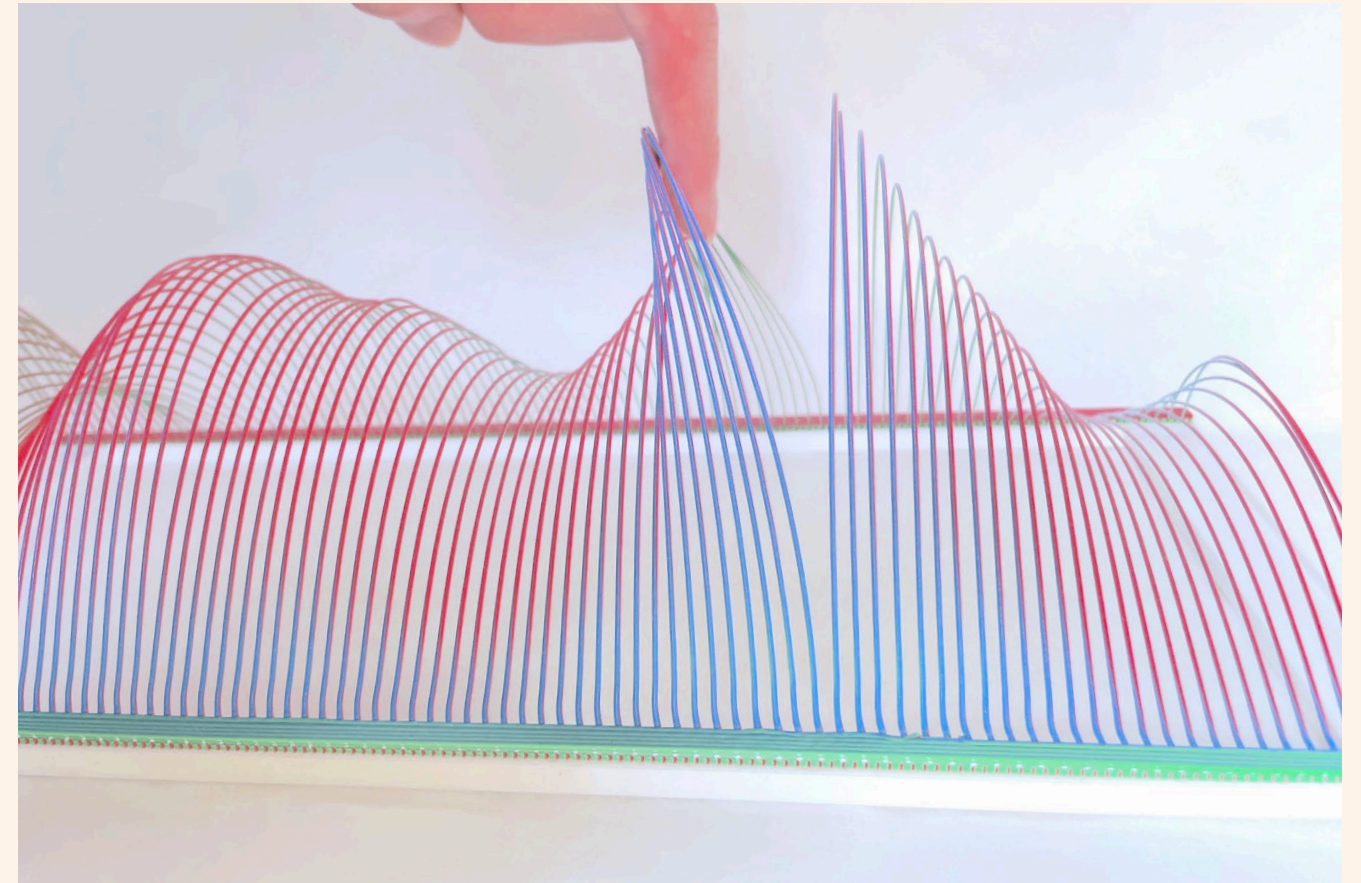


Fig.16: 山脈のような曲面

曲線の制御

曲線一本一本の長さの制御をすることで、曲面を作ることが可能である。長さを少しずつ変化させることで起伏のような形状を作ることができる。

Catenary Printingでは、数値から形を作る設計手法が考えられる。Fig.16は、Perlin Noiseというグラデーションな起伏とランダム性をあわせ持ったノイズを使用し、山脈のような起伏を作ったものである。また、何らかのデータセットから形状を生み出す設計手法も考えられる。例えばセンシングデータから意匠を生み出すことが可能である。



柔らかさ

曲線が独立した細い線であるため、硬いマテリアルを用いても弾力のある柔らかい構造が作れる。また、大型作品 **Fluctuation** (p.39 参照)の制作を通して、太さに対して一定の長さ以上あると揺れが生じることがわかった。長さによって揺れの周期が異なる。

この振る舞いを活かした美しい動きを作ることを主軸にした設計手法が考えられる。長さがグラデーションかつランダムに変化するものを揺らすと周期のずれにより波打つような振る舞いをする(Fig.17)。また、長さの違う振り子をいっせいに動かすと規則的な美しい波動が生まれるペンデュラムウェーブのように、振り子の周期の計算を元に美しい動きを生み出す形状のパターンを生み出せると考える。

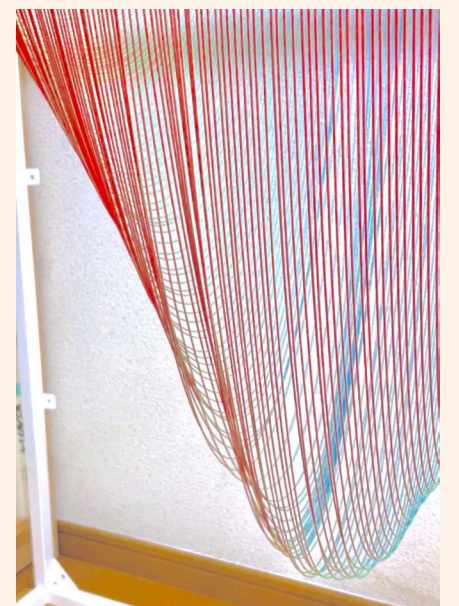


Fig.17: 波打つ Catenary Printing 構造

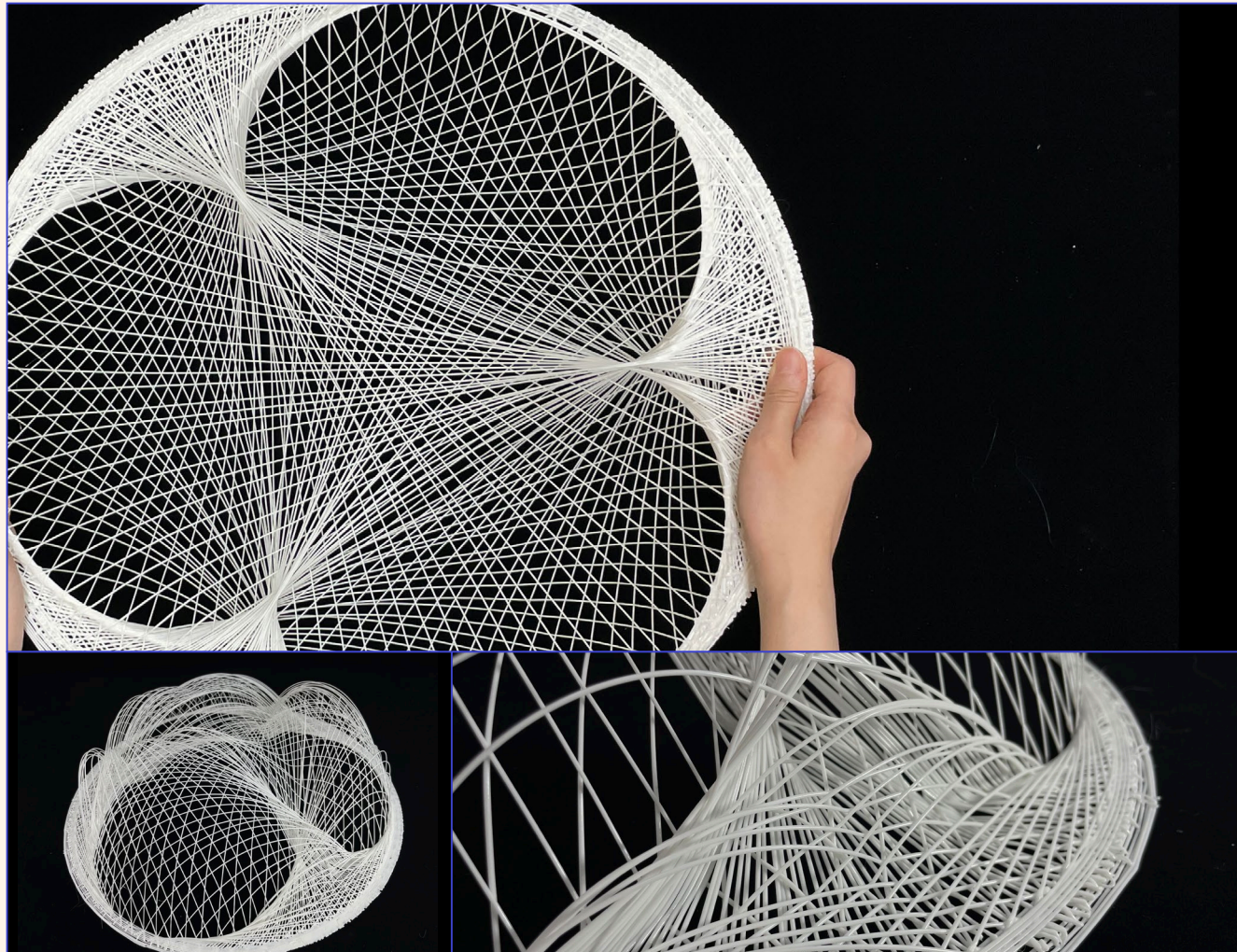


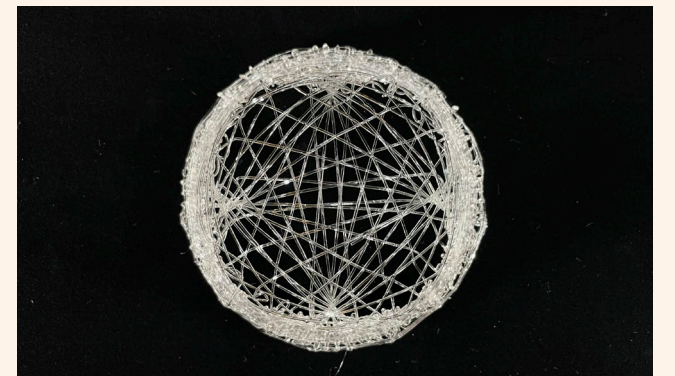
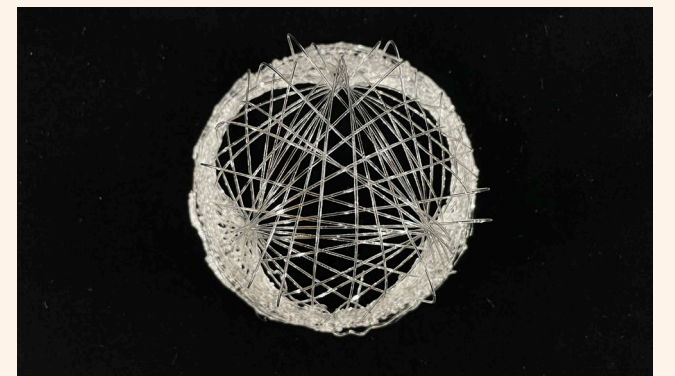
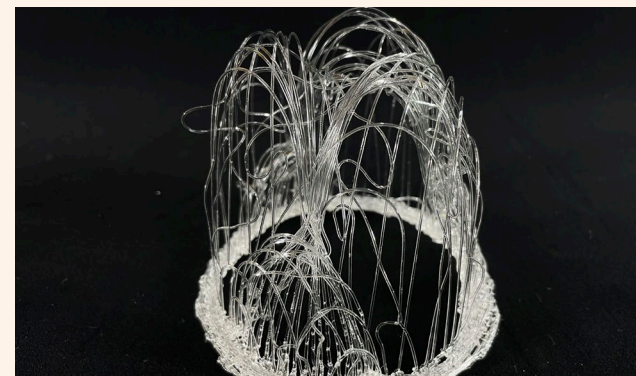
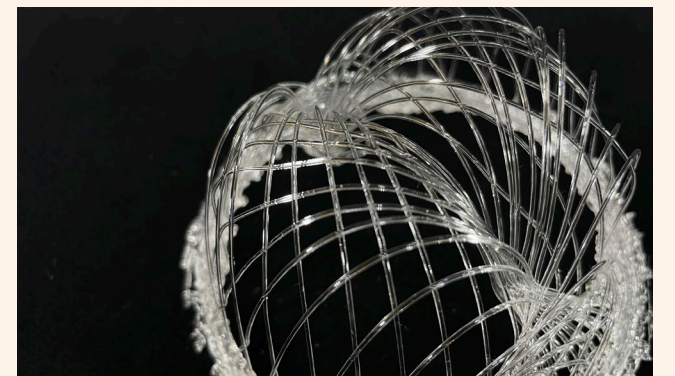
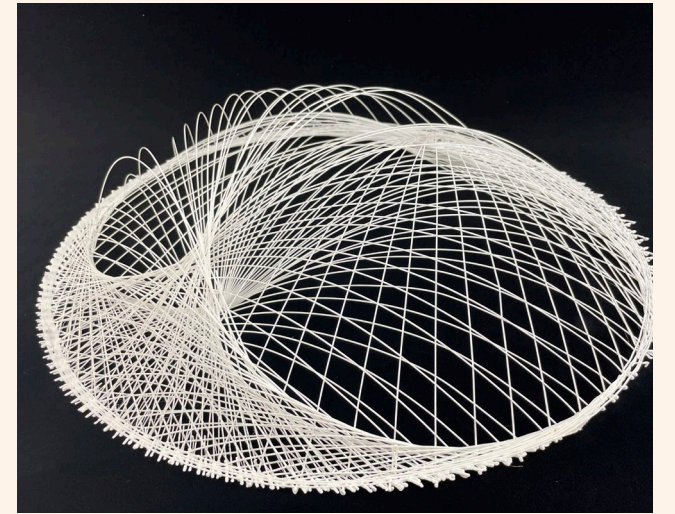
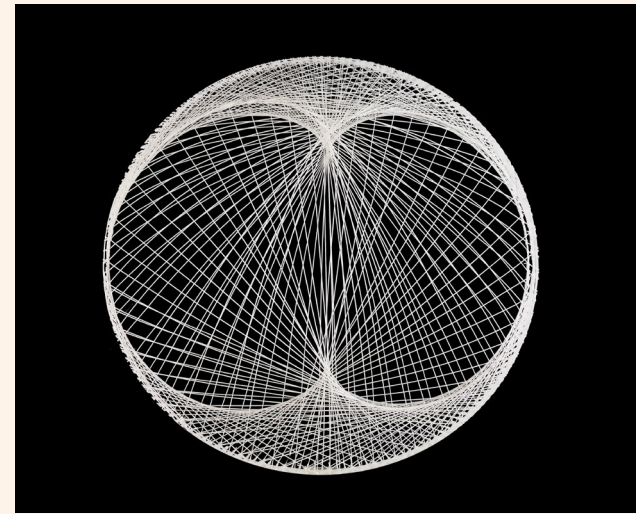
Fig. 18: 複雑な曲面構造 3D プリント協力：株式会社光伸プランニング

複雑な曲面 色の濃淡

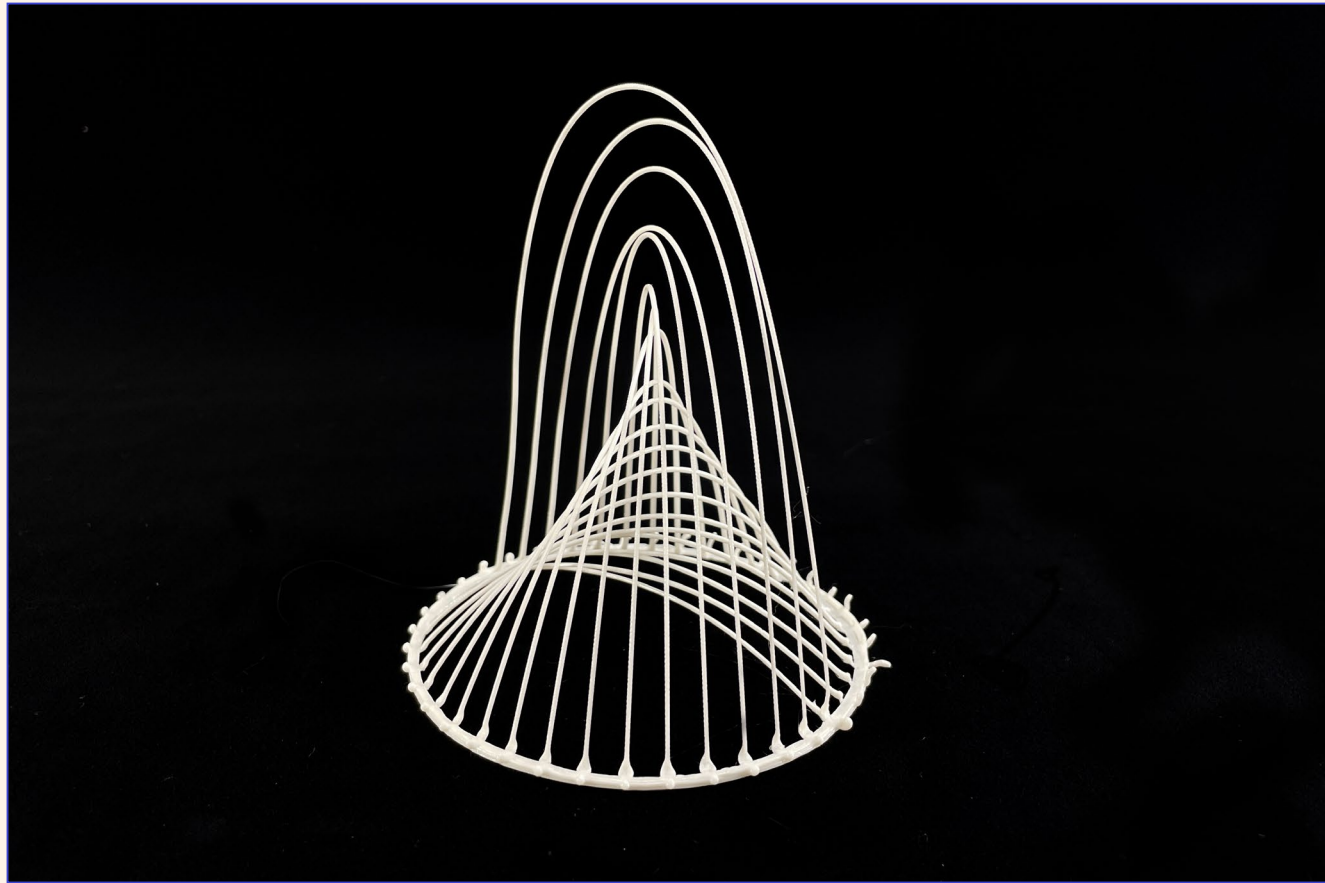
まるで織物のように曲線が重なり合い絡み合うことで、複雑な曲面が生まれる。Catenary Printing するパスの下にすでにプリントした曲線があるとそれに引っ掛かり、1本のパスの中に複数のカテナリーが生まれる。プリントの順番を工夫することで綺麗な曲面が生まれる。また、線の粗密により色の濃淡が生まれている。

Fig.18 はカーゴイド曲線の接線を Catenary Printing したもので、長さの短いパスから順にプリントしている。

プリントの順番と生まれる曲面の形状の関係性や計算方法を突き詰めることができれば、Catenary Printing で複雑な曲面を作る設計手法を編み出すことができると思われる。



3D プリント協力：株式会社光伸プランニング



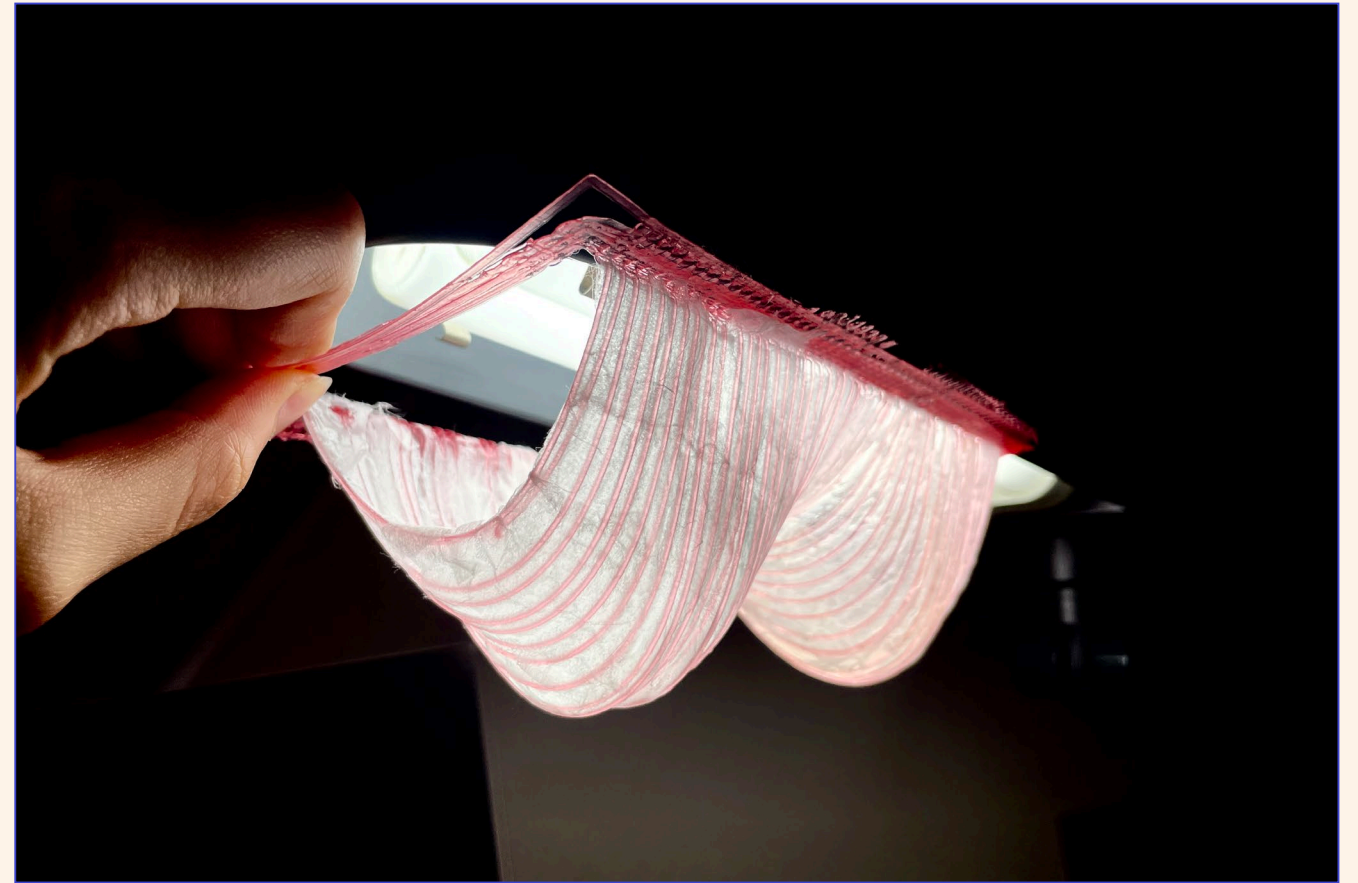
自立

構造体を出力後の向きから上下反転させると、カテナリー曲線はへたらずに自立する。構造的にひずみの少ないカテナリーだからこそ細い構造でもバランスが取れている。よって少ない材料で自立する大きな構造を作ることができる。

ただし、パスの長さに対してパスが細すぎると、形状の歪みによって起こる余分な負荷に構造が耐えられなくなり、Fig.19のように構造が崩れてしまう。同じ長さであっても、パスが太くなればまた自立する。構造解析やシミュレーションを行うことで、構造体の大きさや使用環境に対して適切な太さを設計できると考察した。



Fig. 19: 自立しない Catenary Print



透光性

細い線は光をあまり遮らない。よって明るい空間を持つ構造を作ることができる。

Catenary Printing 構造に薄い和紙を張り子を作るように貼り付け、曲面を持った障子の立体空間を制作した。

カテナリーの粗密に応じて、光の透光性を局所的に制御できるのはいか。明るくする箇所を最低限の密度に、遮光する箇所は密になるような設計手法が考えられる。

Method of Catenary Printing

本節では Catenary Printing をする方法をまとめる。

かさ上げ台

Catenary Printing をするには、樹脂が地面につかずに垂らすことができるよう高さに余裕を持っておく必要がある。そこで、高さをかさ上げた台の上にプリントパスの形状に沿った板を設置し、その上でプリントを行うことでこの高さの余裕を生み出す。プリントが終わった後は造形物を板から剥がす。

冷却

ノズル径に適した冷却を行う。ノズル径が太くなると冷却しにくくなり、樹脂が自重で細長く伸びてしまうため、冷却性能をあげる必要がある。細い構造にはファンを、太い構造には例えばコンプレッサーを用いた冷却を行う。

しかし、冷却を行うと樹脂同士の溶着が悪くなり造形後に剥がれてしまう可能性がある。そこで、カテナリー部以外は冷却機能を切ると強度のある造形が可能となる。

長さの制御

カテナリーの長さの制御は、吐出量の増減によって行う。使用するマテリアルや気温によって必要な吐出量が変わるため、事前にテストプリントをし最適な吐出量を見つけ出す。

テストプリントでは、プリントしたい曲線の深さの最大値と最小値を見つける。例えば直線を描くのに必要な吐出量の 1 から 5 倍の吐出量を設定したものをプリントし、見つけた値を本番のプリントデータに反映させる。

干渉・糸引き防止

ノズルと造形物の干渉に注意しなければならない。Catenary Printing は起伏のないプリントであるが、意図せぬ箇所が突起している可能性がある。ノズルを移動する際には少し高い位置で行う。

また、糸引きが起きている箇所の上から Catenary Printing を行うと、曲線が糸引きに引っ掛かり歪んでしまう。そのため、ノズルに付着した樹脂を拭き取る突起を造形する、ヘッドを移動する際には Catenary Printing する範囲の上を避けるなど、糸引きを起こさない工夫が必要である。

吐出量とスピード

G-code では材料の吐出速度ではなくプリントヘッドの移動速度が設定される。そのため、移動速度を変えずに吐出量をあげると吐出速度は速くなってしまう。材料の吐出速度にばらつきがあると冷却具合が変わってしまい、カテナリーの長さの制御ができなくなってしまうため、吐出量に対して反比例する移動速度を設定し吐出速度が一定になるようにする。

プレ吐出

材料がノズルに一定時間以上留まると、材料が温まりすぎて変質してしまう。そこで、Catenary Printing する前に余分に樹脂を吐出し、劣化していない樹脂で構造物をプリントをすると綺麗なプリントが行える。

Example of a Printing Path

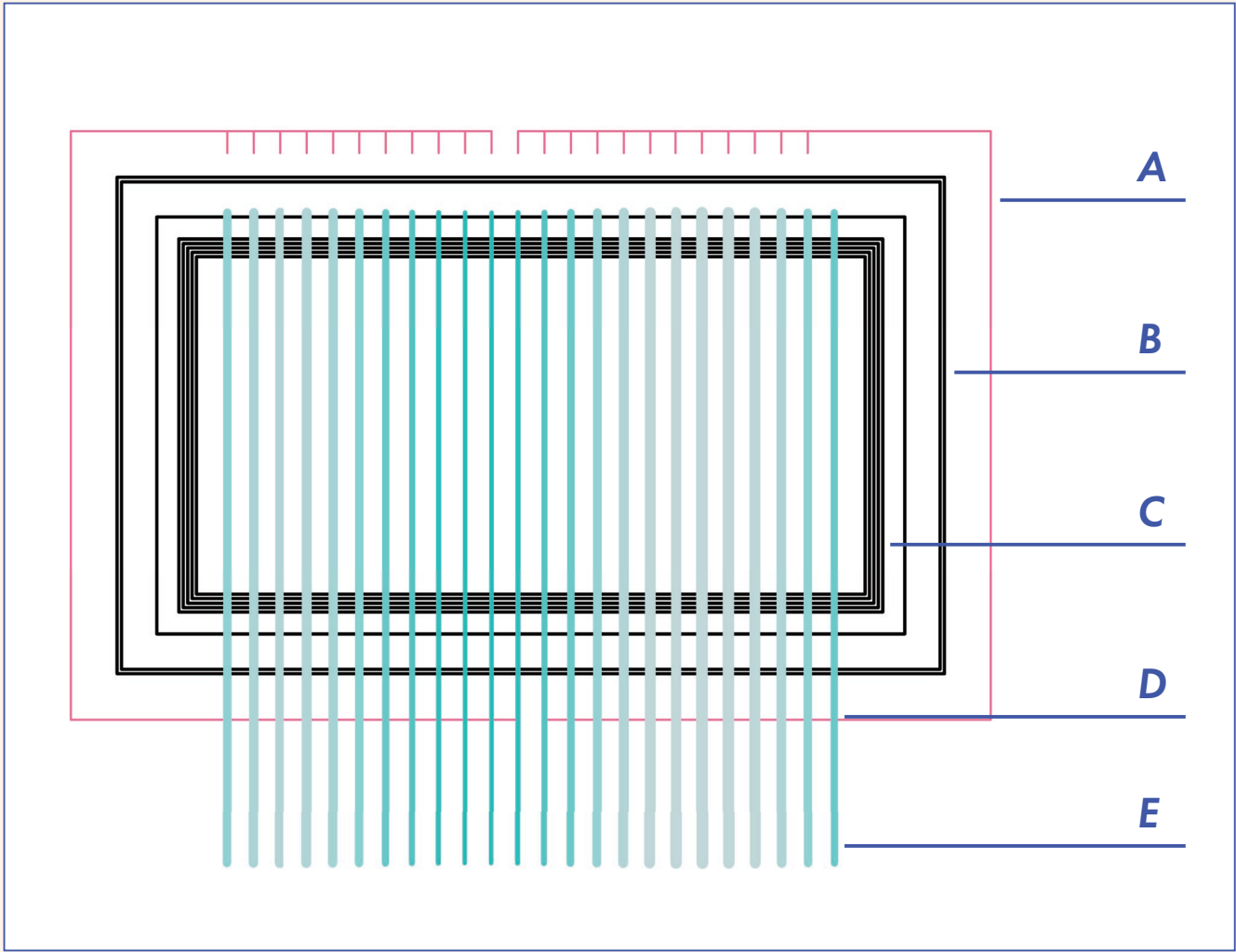


Fig.20: ツールパスの上面図

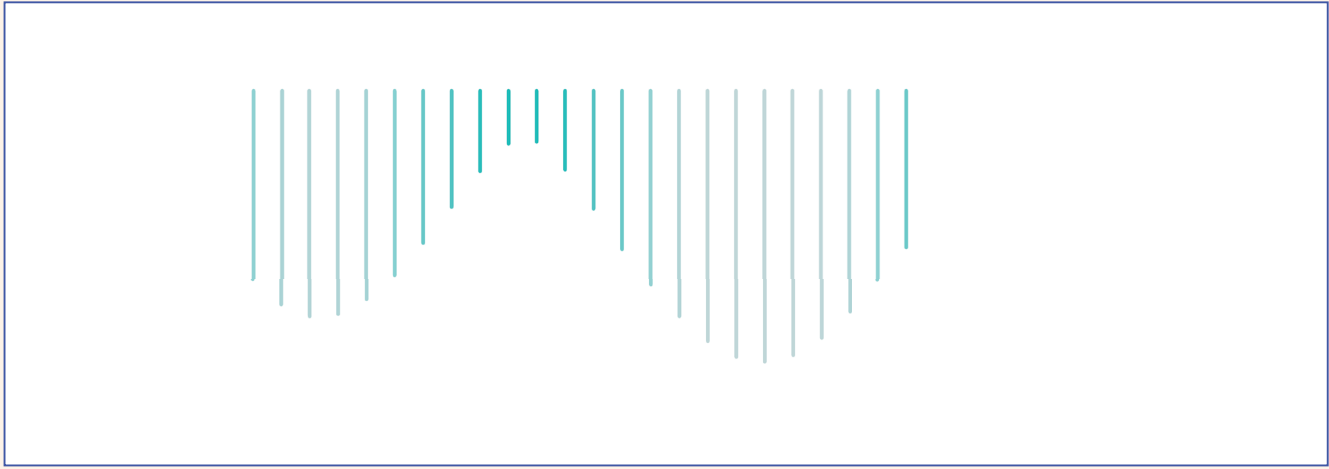


Fig.21: 造形物の正面図

Fig.20 を説明する。Catenary Printing をするには A, B, C, D, E の 5 種類のパスを設計する。

A

プリンターの移動のパス
糸引きや干渉を避けるために Catenary Printing をする範囲の外で移動をする。

B

糸引き防止構造のパス
移動をする際にこの構造にノズルが当たり、ノズルに残った樹脂を拭いとる

C

構造の土台のパス

D

Catenary Printing 構造のパス
Fig20 の中で太い線は吐出量が多いパスを表し、細い線は吐出量の少ないパスを表す。また、色が濃いパスは吐出速度が早く、薄いパスは速度を遅くして出力する。

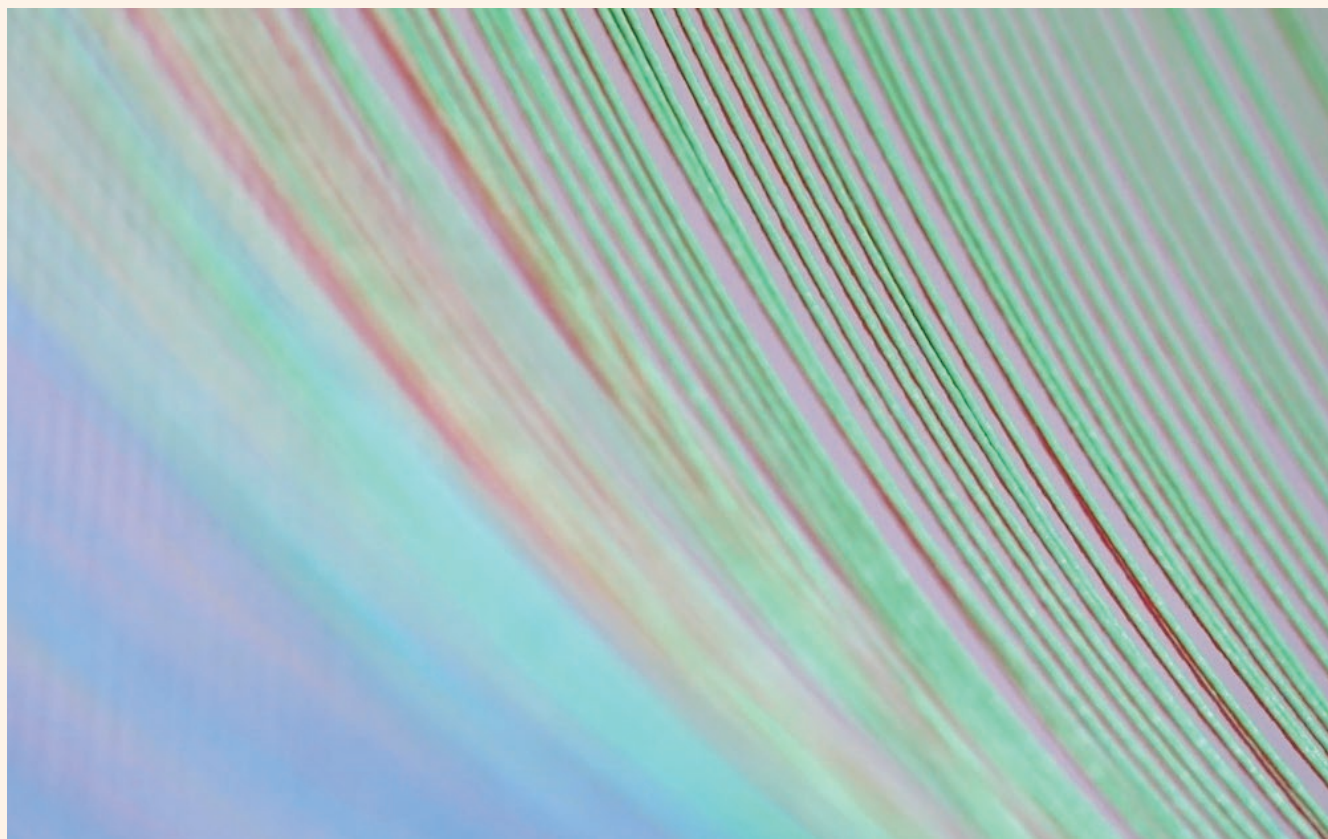
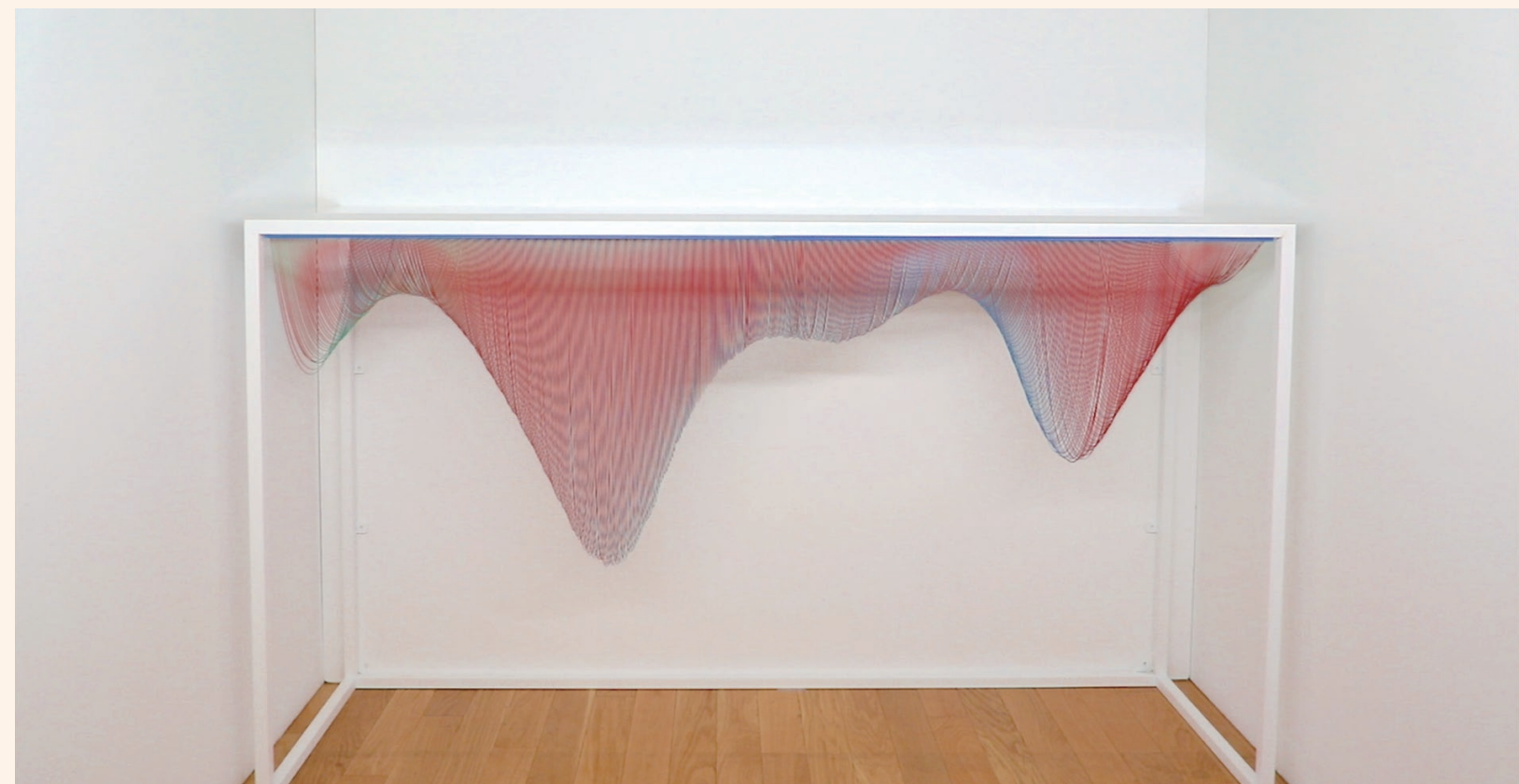
E

プレ吐出のパス (Catenary Printing 構造のパスの延長線)
温まりすぎた樹脂を余分に出力し温度を整える

Fig.20 のようなツールパスを設計し造形をすると、Fig.21 のような Catenary Printing 構造物を作ることが可能である

Catenary Printing Works

Catenary Printing による作品制作を 2 つ行った。1 つ目の作品の **Fluctuation** は、曲線の長さを制御することのできる点に着目し構造を制作した。2 つ目の作品の滴脈の間は、上下逆さにしても自立する点に着目し、中に人が入れる大型作品を制作した。



Fluctuation

2021
SICF 積彩 ブース内装飾
3D プリント協力：株式会社 光伸プランニング

私たちの周りの環境は常に変動している。静止しているように見えるホワイトキューブ内の空間でさえも、気温や鑑賞者の動きにより対流が生まれる。細く繊細な **Catenary Printing** 構造体は、このわずかな動きに反応し揺れる。

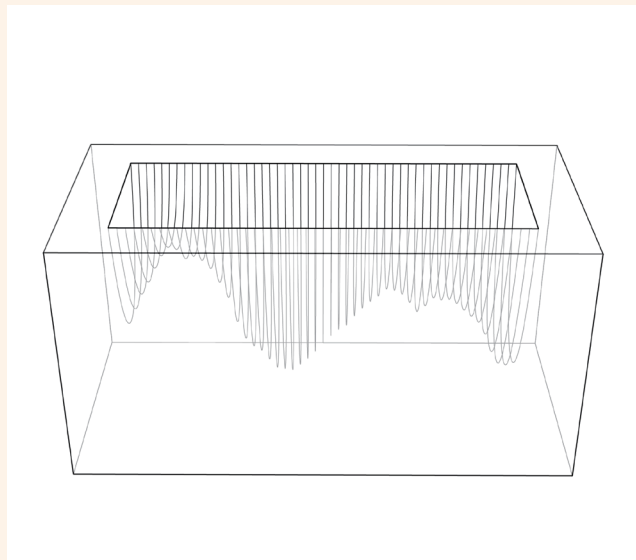
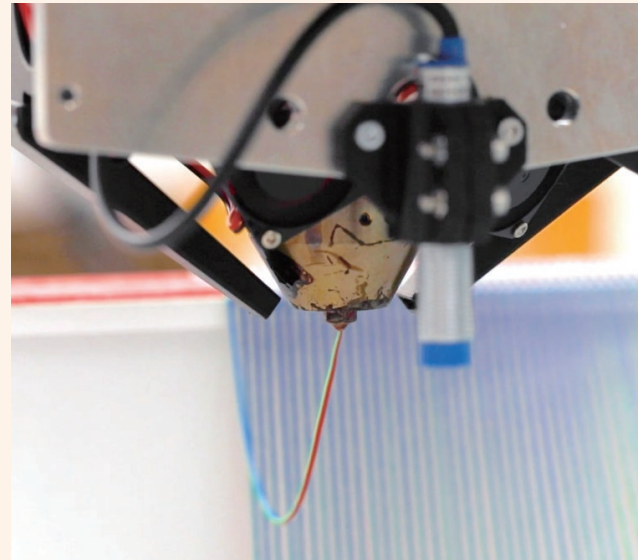
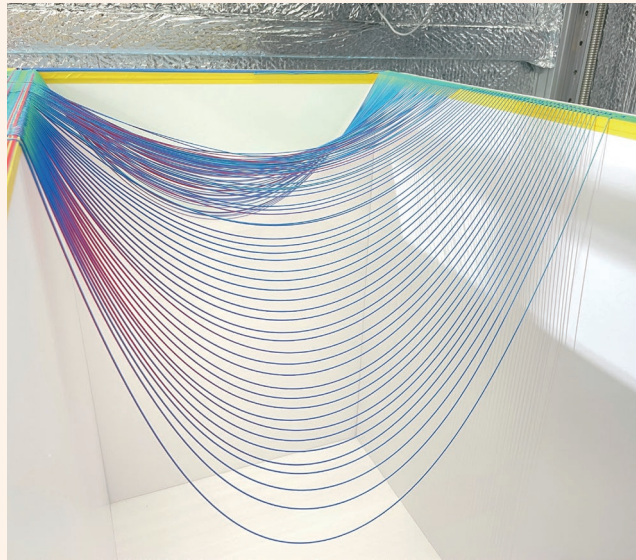


Fig.22: MagnaRecta Arki 2 [48]

Fabrication

幅 1550mm 奥行き 450mm 高さ 900mm の什器を装飾する、カテナリーの深さが最大約 500mm ほどの構造物を制作した。造形範囲 1000mm × 1000mm × 1000mm の大型 FFF 方式 3D プリンター MagnaRecta Arki 2 [48]を用いて、2 つに分割して造形した。フィラメントを 3 本同時に吐出可能な複合射出機構を持つヘッドと 0.8mm 径のノズルを使用し、見る角度によって色が変わる構造物を制作した。ファンを用いて冷却を行った。Catenary Printing をする高さの余裕を作るために、スチレンボードをカッティングプロッターで切り出し箱を作った。

構造物を大型化しても長さの制御が可能であることがわかった。

本作品 "Fluctuation" は株式会社光伸プランニングのご協力のもと制作している。

Reflection

Catenary Printing 構造物を大型化したことにより、細いノズルを用いて長い構造物を作ると糸のように揺れることがわかった。カテナリーの長さによって揺れの周期が異なる。そのためカテナリーの長さがグラデーションに変化する **Fluctuation** は、周期が少しずつずれて波のような振る舞いをする。



滴脈の間

一般社団法人竹芝タウンデザイン(東日本旅客鉄道株式会社)と田中浩也研究室の共同プロジェクトとして、2021年12月8日～12月14日にウォーターズ竹芝という複合施設の芝生広場プラザにて子供向けの遊具群の展示「みらい作庭記 -2021 Winter-」を行った。そこで私は、「滴脈の間」という中を潜りぬけられるトンネル型の遊具を展示した。この「滴脈の間」は、重力が生み出す曲線を用いた風に揺れる柔らかな構造体で、海波のような山脈のような波を表現している。

Concept

みらい作庭記

「作庭記」は、平安時代に書かれた日本最古の作庭方法論書である。

・庭園の立地を考慮しながら「生得の山水」すなわち山・海・川・滝などの優れた自然景観を想起し参考にする

・過去の優れた作例を模範としながら、家主の意向を考慮しつつ、自らのデザイン感覚で仕上げる

・国内の名所の景観を想起して優れた部分を自分の感覚のなかに吸収し、それを必要に応じて庭園に当てはめる[49]

という姿勢を作庭の基本としている。「作庭記」を手本に、3D プリント作品を用いてウォータース竹芝の芝生空間をどう作庭するかが「みらい作庭記」のテーマであった。

このテーマはウォータース竹芝のロケーションに影響



Fig.23: 現地配布パンフレット グラフィック作成: 坂田拓人

されている。ウォータース竹芝は汐留や浜松町の高層ビルが立ち並ぶ立地にありながらも、東京湾の水辺と江戸時代を起源とする浜離宮恩賜庭園に臨む。このような東京の古今が共存する地で、古の庭の作り方を手本に新しい庭を作庭することが展示の試みであった。

展示のメインターゲットは子供とした。ウォータース竹芝は劇場の「JR 東日本四季劇場[春][秋]、自由劇場」、ショップの「アトレ竹芝」、ホテルの「メズム東京、オートグラフ コレクション」からなる複合施設である[50]。施設内の水辺には、船着場と干潟がある。日々さまざまな年代の人々が訪れる施設だが、展示スペースであるプラザ(芝生広場)の芝に多く集まるのは子連れの親子であった。アトレ竹芝内にある子供向け施設の利用や四季劇場での観劇、干潟でのイベント参加、散歩など、さまざまな目的でウォータース竹芝を訪れた親子がプラザの芝に立ち寄る。この芝生に訪れる子供たちをメインターゲットに展示をすることにした。

ターゲットに合わせて、展示物は遊具群とした。会期が冬季であったため寒くなることが予想された。実際、会期中の日ごとの気温は最も暖かい日で平均 11.3℃、最も寒い日は平均 5.1℃であった[51]。寒い冬の屋外でも利用してもらえるように、運動して体が温まるような展示物を選んだ。



滴脈の間

滴脈の間は自然のリズムで揺れるトンネル型の Catenary Printing 構造体である。展示スペースは東京湾に面していて、日中は海から陸へ海風が吹く。Catenary Printing で作った構造は風のエネルギーを完全に吸収することなく、また、激しく煽られることなく、柔らかに受容し揺れて、眼前に開ける東京湾の波と連動する。遠くから観賞したときには、山脈を想起させるように形状を設計した。これらのデザインは作庭記の「庭園の立地を考慮しながら「生得の山水」すなわち山・海・川・滝などの優れた自然景観を想起し参考にする」[49]姿勢を取り入れている。滴脈の間は中を潜り抜けられるトンネル型の遊具でもある。うねるような動線を作ることで、体の向きを変えながら進むような形状に設計した。子供向けの遊具であるが、大人も屈めば入れる高さを担保した。

Fabrication



Fig.24 : ArchiFab MAI

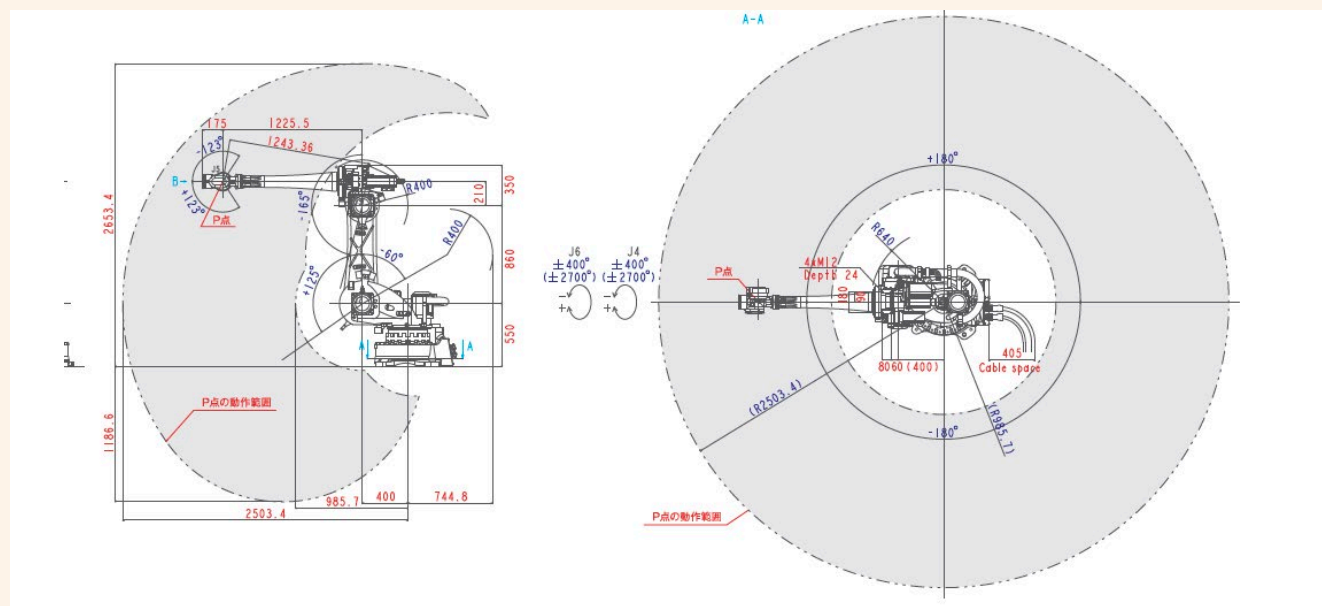


Fig.25 : ArchiFab MAI の造形範囲 [52]

機材は、大型ロボットアーム型 3D プリンター ArchiFab MAI を使用した。ArchiFab MAI は、株式会社デンソーの 6 軸ロボットアーム VLA-4025 に、エス・ラボ株式会社の FGF (Fused Granulate Fabrication) 式ヘッド GEM30HEAD_SFC を装着したものである。

Robot Arm

ロボットアームはガントリー式やデルタ式の 3D プリンターと比較して、機体の大きさに対して造形範囲が大きいという利点がある。今回使用した VLA-4025 のアームの長さは最大約 2500mm で、造形は Fig.25 のような機体を囲う円形の範囲で可能である。ArchiFab MAI は設置位置の都合上、造形範囲に壁や柱などの障害物があるため、半円の範囲のみで造形可能である。また、6 軸ロボットアームは人の腕に近い構造をしており、人間に例えると、1: 腰の回転、2: 肩の旋回、3: 肘の旋回、4: 腕のひねり・回転、5: 手首の曲げ・旋回、6: 手のひらの回転の動作ができ、これらのモーターの角度を組み合わせることで複雑な動きが可能となる。例えば、ノズルを傾けた造形が可能である。

一方で、ロボットアームには 3 軸の 3D プリンターにはない制約がある。ロボットアーム には特異点という、構造的に制御ができなくなる姿勢がある。この姿勢になる座標を通過しようとするロボットアームが暴走してしまうため、特異点を回避したパスを設計する必要がある。

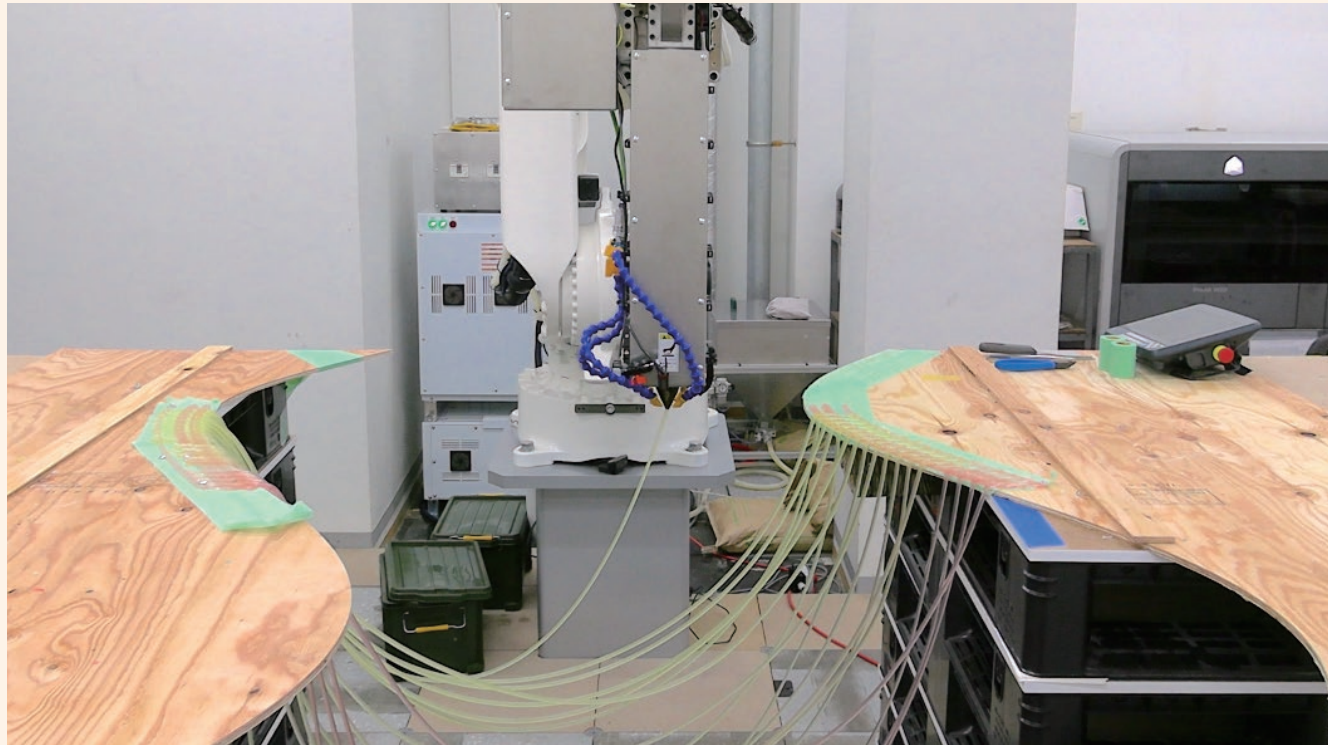
VLA-4025 は PacScript というプログラミング言語の指令により動く。ロボットアームを動かすコマンドには、各軸の角度の J 型変数を指定するモードと、アームの先端の座標と角度の P 型変数を指定するモードがある[53]。慶應義塾大学特任准教授の松岡康友は ArchiFab MAI 専用に G-code を PacScript に変換するプログラムを開発した。G-code で指定される座標は PacScript の P 型変数に変換される。また、各座標間の移動速度の制御も可能である。このプログラムにより今回も G-code を用いて 3D プリント可能となった。

3 軸の 3D プリンターの使用を想定したツールパスの設計をしていたため、今回はヘッドの角度の制御は行わなかった。

FGF Print Head

FGF 方式の 3D プリンターは、ペレットという米粒状の材料をスクリューで押し出してプリントを行う。材料の混合比を少しずつ変化させることができ、例えば色をグラデーションに変化させることが可能である。また、一般的な FFF 方式プリンターと比べて材料の押し出し量が多いため、太いノズルを用いることが可能だ。

今回使用したヘッドの GEM30HEAD_SFC は、軽量化を図るためにロッド部分をアルミ製にし、VLA-4025 の最大可搬質量の 40kg 以内を実現している。



制作

プリントの足場には、高さを生むためのパレットを積み上げ、その上に木工 CNC ルーターの ShopBot で作品の形に切り出した板材を打ち付けた。この板材を切り出す木材の規格であるサブロク板(900mm × 1800mm)を基準に作品のサイズを決定した。材料はユニチカ株式会社のテラマック(R)というポリ乳酸(PLA)のペレットを使用した。ペレットに混ぜる色付きフィラメントの混合比を少しずつ変化させることでグラデーションな色付けをした。また、元々半透明の黄、赤、青のフィラメント(Fig.27)を主材に対して 10% ほど混ぜることで、淡い色を作った。今回、構造に強度を持たせるために 6mm の太いノズルを使用した。それ故にカテナリーの長さを安定させるのに非常に苦戦した。まず、熱い樹脂は液状に柔らかいため、冷却されなければ細長く伸びてしまう。伸びてしまうと長さのコントロールができなくなるだけでなく、構造を支えられる太さを維持できなくなる。今回はパスの径が太く冷却がされにくいいため、コンプレッサーを使用し伸びる現象を抑えた。非常にゆっくり

りとしたスピードで印刷することで、コンプレッサーの風を当てる時間を長くし冷えやすくする工夫もした。特に構造の根元は強度を持たせるためにより低速で出力した。冷却をすると伸びが抑えられる一方で、冷やしすぎてしまっても造形が不安定になってしまう。ノズルの先端が冷えるとノズル内部に Fig.26 のような薄い膜ができてしまい、ノズル径が狭まり、吐出する線が細長くなってしまいます。この膜は放置すると肥大化し、材料が詰まる原因にもなる。ノズルの先端に風が当たらないようにしたり、プリント途中でも定期的にノズルを掃除し膜を除去したりすることでプリントの安定を図った。

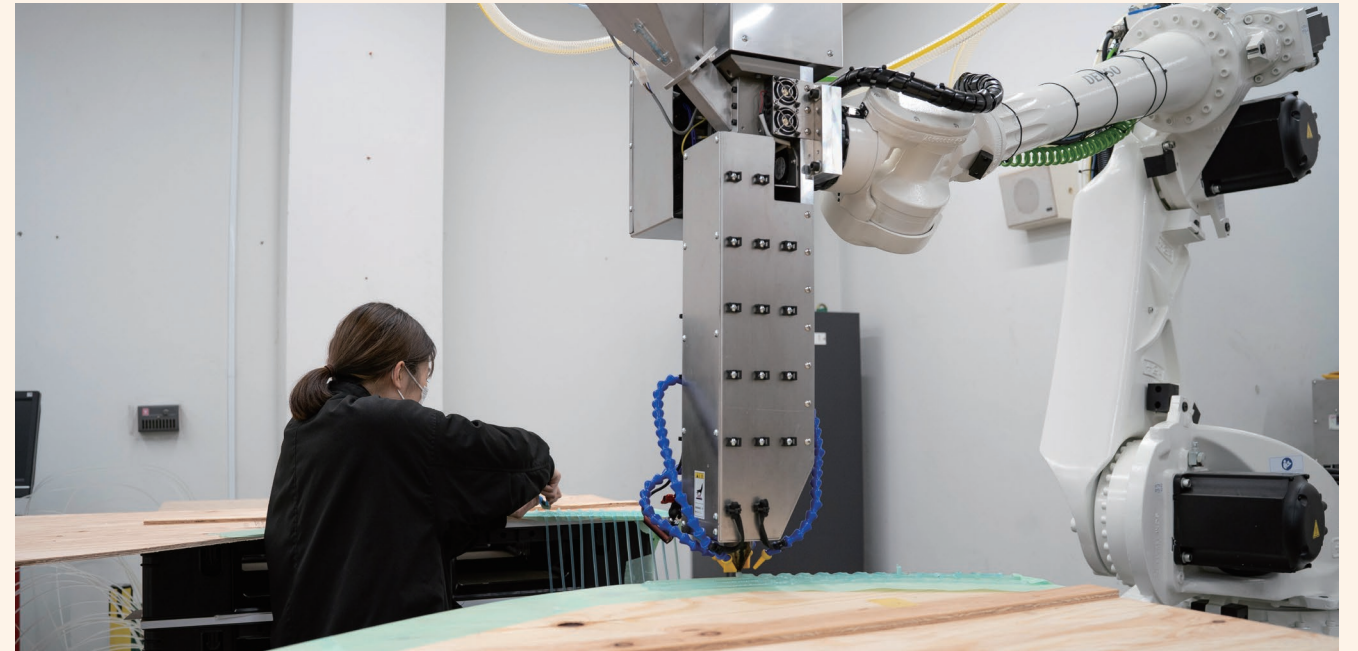
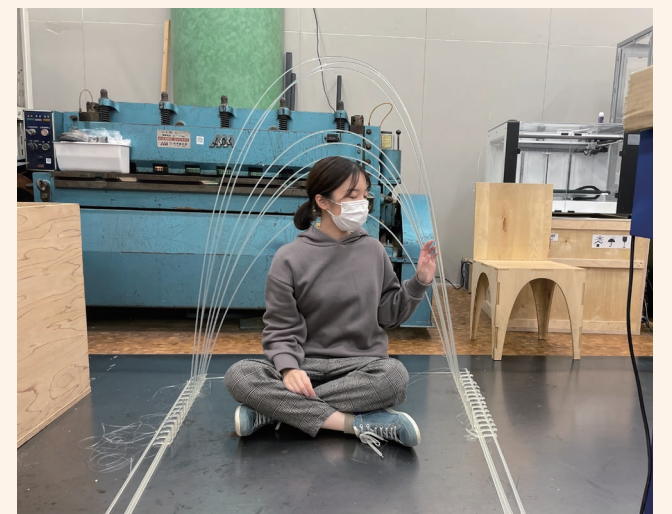


Fig.26: 冷却によって発生する膜



Fig.27: 半透明の PLA 色材





Observation

・トンネルとして

子供たちは滴脈の間を見るとすぐに遊具と認識し、躊躇いもなく潜り抜けて遊んでいたことが印象的であった。説明をされなくても想定していた使い方をしてくれた。慎重にゆっくりと潜り抜ける子供から、猛スピードで走り抜ける子供が見られた。トンネルを何周も同じ向きで潜り抜けたり、向きを変えて往復する様子が見られた。

子供だけでなく大人も潜っていた。

・揺れるオブジェとして

曲線部分を揺らして遊ぶ様子も多く見られた。曲線部分を掴んだり、ハープを鳴らすように掻き撫でたり、叩いたり、頭など手以外の体の部位を当てたりして揺らしていた。

曲線部分がバチバチとぶつかり合う音を鳴らすように揺らす様子が見られた。

・フォトスポットとして

親が子供の写真を撮影する様子が見られた。遊んでいる様子や、ポーズをとる子供の姿を撮影していた。

・閉じた空間として

同時に展示していたブロック状の遊具を使って入り口を塞ぎ、閉じた空間を作る子供がいた。中でしばらく遊んでいた。

Reflection

制作を通して

今回の制作を通して、自立する **Catenary Printing** 構造はデスクトップスケールから高さ 1m の間で造形可能であることが確認された。パスを太くすることで強度を保ち自立する構造が造形できた。パスは太くなると樹脂の冷却スピードが遅くなり、熱い樹脂が自重で伸び細長くなってしまう。そこで、コンプレッサーを用いて冷却をすることで伸びる現象を抑え、自立する強度を持つ太さを担保した。

しかし、パスが太くなるほど制御が難しくなるため、今回はカテナリーの長さの制御はできなかった。うまく行かなかったカテナリーは剥がして、プリントをし直した。また、本来は一括造形できるものであったが、造形失敗のリスクを避けるために分割し 4 回に分けてプリントを行った。形状も、カテナリーからは離れた歪んだ形になってしまった。この点に関しては人為的に設計することのできない複雑な形が生まれたとも言える。

大型スケールでも構造が自立することがわかったが、造形手法としては今回制作したような大型スケールでの造形安定を図るにはまだ多くの検証事項が残される。

展示を通して

Catenary Printing は屋外空間に心地よい隔たりを生むことができる点が評価できる。**Catenary Printing** による線状の隔たりは空間を立体的に区切る境界、移動を妨げる壁としての役割を持ちつつ、風や光、音や匂いなどの周辺環境を妨げない。

また展示を通して、自立する **Catenary Printing** の価値は、人為的に揺らせる点と自然に揺れる点とにあるのではないかと感じた。

展示前に想定していた以上に子供たちは **Catenary Printing** 構造を揺らす行為を楽しんでいた。揺らしたくなる要因の一つとして、**Catenary Printing** 構造同士がぶつかる音が鳴ることが考えられる。残念ながら、今回は安全面を考慮して優しく扱うように促す必要があったが、**Catenary Printing** の特性を最大限に活かした遊具を作るならば、揺らすことを目的に設計していくのが望ましいだろう。

ただし、揺れる表現と強度はトレードオフとなる。展示の 7 日間で **Catenary Printing** の曲線 78 本のうち、8 本が折れてしまった。揺らして遊んだ直後に折れてしまっていた。折れた箇所は全て根元であった。根元は固定されているため、強い力が加わると負荷がかかり折れやすくなってしまう。また、今回使用した材料の PLA は、展延性が低く脆い。構造と材料特性の複合的要因により折れが発生したと思われる。

一方で、強風により激しく揺れて壊れてしまうことはなかった。線状の細い構造であることにより受風面積が小さく、風が通り抜けることができるので風荷重が小さく抑えられたからであろう。耐風性のある構造だと言えるのではないかな。

展示前に想定していたように実際に構造物を屋外に設置してみると風に吹かれて揺れた。その揺れは竹の揺れのような柔らかな揺れで、不規則ながらも心地よい揺れであった。しかし、展示構想段階では想定していた観賞物としての役割はあまり果たしていなかった。より目を引くような動きや心地よさの探究の余地があるのではないかと考える。

Conclusion

本研究では、**Spatial Printing** の新たな造形手法 **Catenary Printing** を提案した。この手法でどのような振る舞いをする構造が作れるのか検討し、その振る舞いを引き出すためにどのような設計手法に発展するかを検討した。

Catenary Printing の特徴は曲線の長さの制御ができる点、柔軟である点、複雑な曲面を造形できる点、上下逆さにすると自立する点、透光性を制御できる点にあると考えた。今回は、**Catenary Printing** の長さを制御することで曲面が造形できる点に着目して設計システムを開発し、このシステムを用いて2つの作品を制作した。

一つ目の作品は波打つような曲面構造を持つ **Fluctuation** である。曲線の長さを制御することのできる点と構造が柔軟である点に着目し構造を制作した。曲線の長さによって揺れの周期が異なるため、長さがグラデーションに変化するものを揺らすと周期のずれにより波打つような振る舞いをする事がわかった。

二つ目の作品は中に人が入れるほどの大きさの遊具の滴脈の間である。構造を上下逆さにしても自立する点に着目し、トンネル構造を制作した。この構造は、空間を区切る立体的な境界としての役割を持ちつつ、風や光などの周辺環境を妨げない柔らかな隔たりを生む。展示を通して、風に揺れるだけでなく人為的に揺らしたくなることが確認された。

今後の研究課題としては、**Catenary Printing** の特徴を応用した他の設計手法の構築が考えられる。例えば、美しい動きを生み出すための設計手法の構築が考えられる。揺れの周期を計算しカタナリーが群として心地よい動きをするように設計した結果から形状が生まれる設計手法が考えられる。

また、複雑な曲面を生み出す手法(p.28 参照)を突き詰め **Catenary Printing** する順番や一本一本の長さを計算できるようになれば、複雑な編みかごのような構造を作る新たな手法を作ることも考えられる。

また、他の造形手法と組み合わせることも考えられる。本研究では、構造を大きくするには構造の安定のため

にパスを太くする必要があり造形が困難になることがわかった。そこで、炭素繊維やジュート繊維の糸を樹脂とともに吐出しパスの強度を高める **continuous fiber-reinforced thermoplastics** という造形技術[54]と組み合わせ、パスを太くせずに大型化を図ることができると思われる。

今後の展望としては、美しい動きをする屋外空間のパーテーションへのアップデートが考えられる。自分を覆うように空間を区切りつつ周辺環境を妨げない **Catenary Printing** 構造は、カフェのテラスや公園で屋外空間の心地よさを損わずにパーソナルスペースを確保するものとなる。また、遠くから見ると人は綺麗に揺れるオブジェとなり、屋外空間に彩りを添えるのではないかな。

謝辞

はじめに、学部 1 年の秋学期から 3 年半ご指導いただきました田中浩也教授に心より感謝いたします。たくさんの助言や展示のチャンスをいただきとても刺激的な大学生活となりました。

本研究で大型の造形に挑戦するにあたり、松岡様には大変お世話になりました。松岡様なしには大型の造形に挑戦することはできませんでした。本当にありがとうございました。

展示「みらい作庭記」を遂行できたのは、一般社団法人竹芝タウンデザインの星野様の多大なるご尽力のおかげです。お忙しい中、充実したイベントと一緒に作り上げていただきありがとうございました。

株式会社光伸プランニングのみなさまのご尽力により本研究のテーマ **Catenary Printing** にたどり着くことができました。機材を貸していただき、また、円滑に出力を進められるようにサポートしていただきありがとうございました。

研究室の仲間、先輩（特に積彩のメンバー）、同期にも感謝してもしきれません。私の至らないところをたくさん補ってくれて本当にありがとうございました。

最後に、いつも温かく支えてくれた家族に心から感謝いたします。

木下里奈

出典

- [01] "3D プリントでつくれるサンダル." Fabble, 2020-12-10, <https://fabble.cc/mippu/xcloudsandals>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [02]Oxman, Neri, et al. "Freeform 3D Printing: Towards a Sustainable Approach to Additive Manufacturing." Green Design, Materials and Manufacturing Processes published by Taylor & Francis , 2013
- [03] "Mataerial." Mataerial, <http://mataerial.com/>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [04] Laarman, Joris, et al. "Anti-Gravity Additive Manufacturing." Fabricate 2014, 2017, pp. 192–197.
- [05] Yu, Lei et al. "Highly Informed Robotic 3D Printed Polygon Mesh A Novel Strategy of 3D Spatial Printing."Conference: Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), p. 298-307, 2016
- [06] "Rapid Liquid Printing." Self-Assembly Lab, <https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing> . Accessed 28 Jan. 2021..
- [07] "Liquid Printed Products." Self-Assembly Lab, <https://selfassemblylab.mit.edu/liquid-printed-products> .(閲覧日 2021-01-28)
- [08] "Liquid Printed Metal." Self-Assembly Lab, <https://selfassemblylab.mit.edu/liquid-printed-metal> . Accessed 28 Jan. 2021.
- [09] Yang, Humphrey, et al "Freeform Fabrication of Fluidic Edible Materials." ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21) , 2021
- [10] "Spongebob Flower Stool." ExLab, Experimental Design Lab, <https://exlab.org/work/spongebob-flower-stool>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [11] Anderson, Harry "Atolla Table." Behance, <https://www.behance.net/gallery/47942023/Atolla-Table>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [12] "GCODE.Clay." Emerging Objects, <http://emergingobjects.com/project/gcode-clay/>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [13] Mueller, Stefanie, et al. "WirePrint: Fast 3D Printed Previews." UIST '14: Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, 2014
- [14] Wu, Rundong, et al. "Printing Arbitrary Meshes with a 5DOF Wireframe Printer." SIGGRAPH '16 Technical Paper, 2016
- [15] Peng, Huaishu, et al. "RoMA: Interactive Fabrication with Augmented Reality and a Robotic 3D Printer." CHI 2018, 2018
- [16] "Mesh Mould." Gramazio Kohler Research, <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/221.html>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [17] Hack, Norman, et al. "Mesh-Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork." Architectural Design (Architect Des), 2014
- [18] "Iridescence Print." Gramazio Kohler Research, <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/296.html>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [19] Helm, Volker, et al. "Iridescence Print: Robotically Printed Lightweight Mesh Structures." 3D Printing and Additive Manufacturing, 2015
- [20] "Flotsam & Jetsam." SHoP, <https://www.shoparc.com/projects/design-miami/>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [21] "BranchMatrix." Branch Technology, https://branchtechnology.com/wp-content/uploads/2021/10/Branch-Technology_BranchMatrix.pdf. Accessed 28 Jan. 2021.
- [22] "RC4 - CurVoxels." Design Computation Lab, <https://designcomputationlab.org/rc4-curvevoxels>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [23] Kwon, Hyunchul. "CurVoxels: SPATIAL CURVES: Portfolio: 2014-2015." issuu, https://issuu.com/hyunchulkwon/docs/curvevoxels_final_portfolio_issuu. Accessed 28 Jan. 2021.
- [24] "VOXELCHAIR V1.0." Design Computation Lab, <https://designcomputationlab.org/voxelchair-v10>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [25] "Manuel Jimenez Garcia Worksample 2019." issuu , https://issuu.com/emeidiem/docs/mjg_worksample-2019-04-02_web. Accessed 28 Jan. 2021.
- [26] "Li-Quid." Alisa Andrasek, <https://www.alisaandrasek.com/projects/li-liquid>. Accessed 28 Jan. 2021
- [27] "Brass 5C kit - 0.8mm." nonplanar.xyz, <https://www.nonplanar.xyz/product-page/xyz-kit-5c-0-8mm>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [28] "File:"Spider".JPG " Wikimedia Commons, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SpiderCatenary.jpg>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [29] Khodadadi, Anahita. "Catenary Cables and Arches." Basic Concepts of Structural Design for Architecture Students
- [30] " ガウディと井上雄彦." カーサ ブルータス ,マガジンハウス , 2015
- [31] 佐々木、睦朗 " フニクラ 実験とガウディのフォルムの考え方 ." ふしぎの国のガウディ , 株式会社エクストレッジ
- [32] ¡arturiii! "Col-legi de les Teresianes." flickr, 2011, <https://www.flickr.com/photos/arturdebat/15727095010>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [33] NMK Photography "Madness or Genius?." flickr, 2017. https://www.flickr.com/photos/fijian_scion/35243505860/in/photolist-W8har5-WhvDJr-VGmbqL-W8hauw-WhvE3x-VGmbsE. Accessed 28 Jan. 2021.
- [34] "File:Ingalls Rink 1980s.jpg " Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ingalls_Rink_1980s.jpg. Accessed 28 Jan. 2021.

- wiki/File:Ingalls_Rink_1980s.jpg. Accessed 28 Jan. 2021.
- [35] "File:David S. Ingalls Hockey Rink, Yale University, New Haven, Connecticut. Longitudinal section and cross section.jpg " Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:David_S._Ingalls_Hockey_Rink._Yale_University._New_Haven._Connecticut._Longitudinal_section_and_cross_section.jpg. Accessed 28 Jan. 2021.
- [36] "File:Washington Dulles International Airport at Dusk.jpg" Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Washington_Dulles_International_Airport_at_Dusk.jpg. Accessed 28 Jan. 2021.
- [37] Allen, Edward. "Understanding Famous Structures Through Simple Graphical Analyses ." BUILDING TECHNOLOGY CONFERENCEI,1996
- [38] " 国立代々木競技場〈旧 国立屋内総合競技場〉 ." TANGE, https://www.tangeweb.com/works/works_no-27/. Accessed 28 Jan. 2021.
- [39]独立行政法人日本スポーツ振興センター "『国立代々木競技場耐震改修等工事』の記録 "https://www.jpnsport.go.jp/yoyogi/Portals/0/yoyogi1st_01-02.pdf. Accessed 28 Jan. 2021.
- [40] "File:JP-Kagawa-Great-Seto-Bridge-Minami Bisan-Seto-Bridge.jpg " Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JP-Kagawa-Great-Seto-Bridge-Minami_Bisan-Seto-Bridge.jpg. Accessed 28 Jan. 2021.
- [41]中村竜治 " コントロールされた線とされない線 " 現代建築化コンセプトシリーズ , LIXILL 出版 , 2013
- [42] Ryuji Nakamura and Associates, https://www.ryujinakamura.com/2_works/081030_ribbonproject/1_page/ribbonproject.html. Accessed 28 Jan. 2021.
- [43] Ryuji Nakamura and Associates, https://www.ryujinakamura.com/2_works/090207_legrandmacabre/1_page/legrandmacabre.html. Accessed 28 Jan. 2021.
- [44] Ryuji Nakamura and Associates, https://www.ryujinakamura.com/2_works/110901_costumenational/1_page/costumenational.html. Accessed 28 Jan. 2021.
- [45] Ryuji Nakamura and Associates, https://www.ryujinakamura.com/2_works/100624_seibuikebukuro/1_page/seibuikebukuro.html. Accessed 28 Jan. 2021.
- [46] Ryuji Nakamura and Associates,https://www.ryujinakamura.com/2_works/141227_shiseidoparlor3/1_page/shiseidoparlor3.html .Accessed 28 Jan. 2021.
- [47] Ryuji Nakamura and Associates, https://www.ryujinakamura.com/2_works/190826_reif/1_page/reif.html. Accessed 28 Jan. 2021.
- [48] "Arki." MagnaRecta, <http://magnarecta.com/arki/>. Accessed 28 Jan. 2021.
- [49] 鳥根県技術士会 " 千年前の造園指南書「作庭記」について ." https://peshimane.net/wp/wp-content/uploads/2020/02/2019_08_%E5%8D%83%E5%B9%B4%E5%89%8D%E3%81%AE%E9%80%A0%E5%9C%92%E6%8C%87%E5%8D%97%E6%9B%B8%EF%BC%88%E5%B1%B1%E6%9D%91%E8%B3%A2%E6%B2%BB%EF%BC%89.pdf. Accessed 28 Jan. 2021.
- [50] ウォーターズ竹芝 -WATERS takeshiba, <https://waters-takeshiba.jp/> . Accessed 28 Jan. 2021.
- [51] 気象庁 " 気象庁 | 過去の気象データ検索 "https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_s1.php?prec_no=44&block_no=47662&year=2021&month=12&day=&view= . Accessed 28 Jan. 2021.
- [52] " 垂直多関節ロボット VMB ・ VLA シリーズ "DENSO. https://www.denso-wave.com/dl/ja/robot/download/brochure/index_1/DENSO+Robotics_RC9VMVL_JP.html. Accessed 28 Jan. 2021.
- [53] " ロボットスクール基本コース (WEB 版)"Denso DENSO WAVE. Accessed 28 Jan. 2021.
- [54] Matsuzaki, Ryosuke et al. "Three-dimensional printing ofcontinuous-fiber composites by in-nozzle impregnation."Scientific Reports, 2016

My Works

Genetic Textile

2020

Project: Genetic Fabrication

Members: Keisuke Saito, Ryota Nakamura, Rina Kinoshita

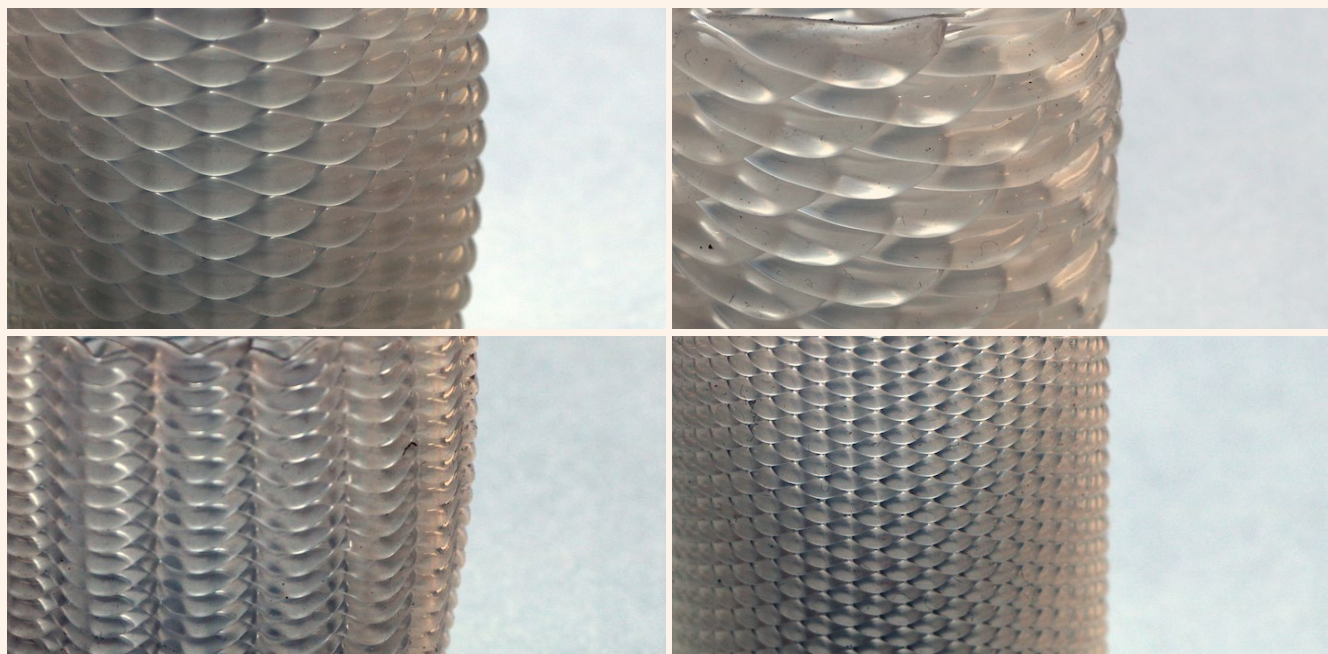
Material: TPU

Machine: M3D QuadFusion (Multi-Filament FFF Printer)



Genetic Textile は自分の情報がモノの色や形に反映されることをコンセプトに制作したメッシュ状のテキスタイルである。1日の活動量をセンシングしたものがパターンの色と形となって現れている。一本一本がある時間帯を表していて、活動量が多くなるほど白→青→紫へと変化していく。サンダルのアッパーに用いた。

4本のフィラメントを任意の配合で混色可能な FFF 方式プリンター **QuadFusion** を使用している。着色できる機材の登場により、物質に色情報を乗せられるようになった。この制作ではセンシングした情報を色に変換し、パス単位で表現している。



Refractive Prints

2018

Material: Elastomer

Machine: ArchiFab Tatami (FGF Printer)



Wave Textured Prints

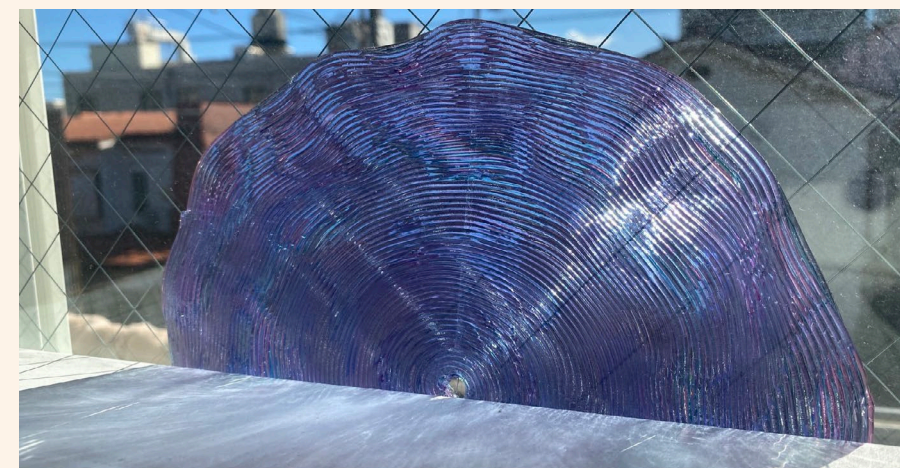


Gradient Height Prints

パスの太さを変化させることで、透明樹脂による光の透過と屈折を制御する造形手法の試作である。

Wave Textured Prints : 材料を押し出しと停止を繰り返すことで波のようなテクスチャを生み出した。波と波の間には隙間が空いており、編み目のようになっている。押し出しの間隔と量を変動させることでさまざまなパターンの波のテクスチャが生まれる。

Gradient Height Prints: 押し出す材料を積む高さと量をグラデーションに変化させることで太さを変えている。



Moire

2021

Creator: Soya Eguchi, Rina Kinoshita

Material: Elastomer

Machine: ArchiFab Irori (FGF Printer)

渦巻状にパスを描いたシートを2枚重ねあわせたもの。シートにはパス同士の境界線がテクスチャとして現れ、2枚重ねることで、モアレ現象のような模様が浮かび上がる。また、視点を移動させるとモアレの模様が動く。