

TensionMod: 張力により変形可能な平面モジュールとその組み合わせによる造形の提案

TensionMod: A Proposal for Tension-based Shape Changeable Planar Modules
and Shape Forming with Their Combination

呂 亜輝¹, 浦田 泰河¹, アレッサンドロ・ガルザンティ², 笥 康明¹

Yahui LYU¹, Taiga URATA¹, Alessandro GARZANTI², Yasuaki KAKEHI¹

¹ 東京大学, ² WAU2223 Structural Design

¹ The University of Tokyo, ² WAU2223 Structural Design

【要約】

本研究では、レーザーカッターや CNC で加工された平面素材をモジュールとして用い、それらを組み合わせで曲げ、様々な立体を造形する手法を提案する。各モジュール内部のアーム同士を引っ張って接続するとモジュールが曲面に変形し、接続位置を変えると曲面が変化する。アームの配置パターンの違いによって複数種類のモジュールを設計し、それらのモジュールを組み合わせることで立体が造形できる。アームの接続を外すと元の平面に戻るため、輸送のコスト軽減やモジュールの再利用が期待できる。入手容易な素材を用いて誰もが自由自在に造形できるため、建築・ファッション・教育ツールなどの分野での実装が考えられる。

キーワード: デジタルファブリケーション, モジュール, 張力による造形, プロトタイプ

【Abstract】

In this study, we propose a method of forming various three-dimensional objects by combining and bending flat modules processed by a laser cutter or CNC. When the arms inside each module are connected by pulling, the module is transformed into a curved surface, and the curved surface changes when the connection position is changed. There are multiple types of modules with different arm arrangement patterns, and a three-dimensional object is formed by combining these modules. When the arms are disconnected, the module returns to its original flat surface, thus reducing transportation costs and allowing reuse of modules. Since anyone can freely create the shapes using readily available materials, it is expected to be implemented in fields such as architecture, fashion, and educational tools.

Keywords: digital fabrication, module, tension-based shape making, prototype

1. はじめに

輸送や造形にかかるコスト軽減、装置規模を超えるような大型造形、またユーザによる形状の変更・カスタマイズなどのニーズに向けて、ブロックや折り紙などの手法をファブリケーション [1] に応用し、小さく、または薄く造形された素材を組み立てる、あるいは変形させることで立体的な形状を作るファブリケーション手法に注目が集まる。

今回筆者らは、デジタルファブリケーション装置により平面素材を加工し、その後人力による変形を経て様々な立体形状造形を可能にする新たな立体造形手法 TensionMod を提案する。具体的には、入手容易な平面素材(ケント紙や薄い合板など)にレーザーカッターや CNC などファブリケーション装置で切れ込みを入れる。図 1 のように、素材に施された切れ込みを重ねるようにつなげることで、局所的に張力をかけ、その部位に曲げを施す。これらをモジュールのように平面素材上の各部位に配置することで、全体として複雑な形状の造形を目指す。この手法は、全体の変形に必要な引張力が各モジュールに分散されるため、機械を使わずに人力で組み立てることができるという手軽さに特徴がある。

以下本稿では、関連研究、本手法の設計や実装、

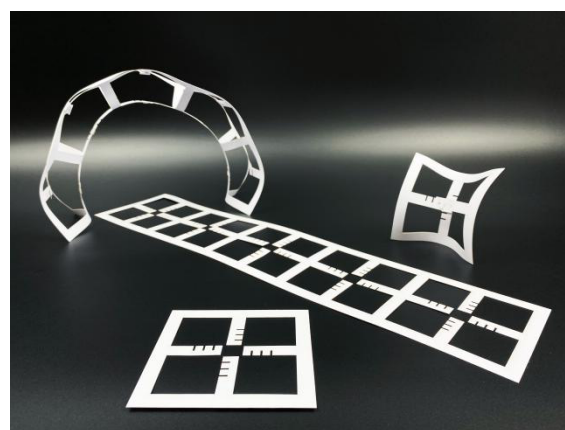


図 1. TensionMod 概観

および応用可能性について述べる。

2. 関連研究

平面に近い素材から立体形状を作る研究としては、空気注入による素材の膨張を利用するもの [2], 逆に脱気によるジャミング現象を利用するもの [3] などが挙げられる。これらは立体の状態と平面の状態を行き来できるという利点はあるが、素材の製造に特別な装置を必要とし、また空気の出し入れにポンプを必要とするという

制約がある。また、立体的に造形されたオブジェクトに対して物理的に力がかかることで意図した変形を施す手法が様々な研究で活用されている。例として, KinetiX [4]と HSA actuators [5] は, 圧縮力やせん断力によってオーゼティック構造の材料を成形・変形している。しかし, これらを身体スケールの大型の造形物に適用しようとすると, 圧縮力による変形だと材料の硬度と節点の剛性が必要になるため, 全体の重量が増加し組み立ての難易度が高くなることが予想される。HSA actuators の場合は, 構造強度と靱性を両立させた素材が必要になり, 円柱の中間部等で座屈が発生しやすくなる。これに対して, 今回の筆者らの提案手法は, モジュールを主に引張力で変形させることで, 大規模(ルームスケール)かつ軽量の建造物の製作を可能にする。

また, 本研究のもう一つの特徴である小さなモジュールの組み合わせで大きなスケールと形状を得る手法についての関連研究として, NURBSforms [6] はモジュールで構成される変形曲面インタフェースであり, モジュールを組み合わせることで多様な形状(三角形, 正方形, 混合形状)が得られる。Dynablock [7] は小さな立方体モジュールの組み合わせにより, 3D 形状を迅速的に生成し使い終わったら分解できる, 再利用可能な3D プリンティングの手法である。本研究では, 各モジュール内部の 2 組のアームを接続することでモジュールごとに成形と変形が行われ, そのモジュールの組み合わせにより多様な形状が得られる。また, このモジュールの形状は平面的かつ正方形であるため, 隣接するモジュールと組み合わせるためのジョイントのデザインが容易である。

3. 基本原理

3.1 モジュールの構造

TensionMod は, 張力によって立体形状を成形・変形する造形手法である。正方形のモジュール(図 2)は周縁のフレームと内部のアームという 2 つの部分で構成される。各アームの一端はフレームと繋がり, もう一端にはアームジョイントが設置され, 向かい側のアームとの間に隙間が設けられている。向かい合う 2 本のアームをアームジョイントと呼ぶ切れ込みで接続すると, 図 3 のよ

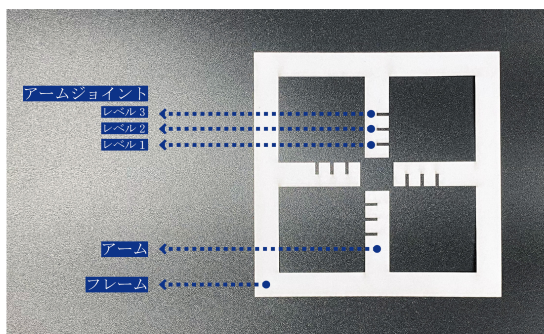


図 2. 正方形のモジュールの基本設計

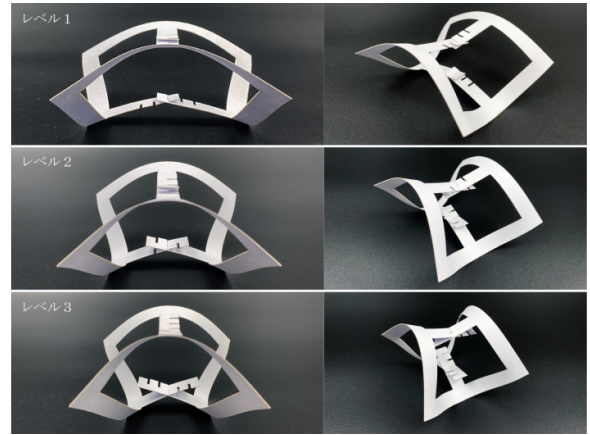


図 3. アームジョイントによる変形

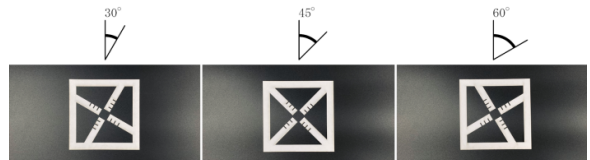


図 4. アームの回転による配置パターン

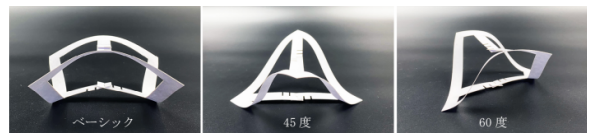


図 5. アームの配置パターンによる変形

うにモジュールの中心方向への引張力がアームに発生し, フレームが曲がり立体形状が生成される。アームジョイントを固定すると, モジュール全体で圧縮力と引張力の大きさが釣り合う。また, アームジョイントの固定する位置を調整することで, 発生する引張力の大きさを変えることができ, フレームの曲がり具合を調整できる。

TensionMod によって造形される建造物は, プレストレスが導入される。モジュールのアームジョイントが固定されると, 建造物全体が平面形状から立体形状に変化し自立する構造になる。アームを引っ張ることで建造物全体に応力が与えられ, 荷重(自重)に対する各部分の強度が上がる。

3.2 モジュールの変形原理

モジュールのアームを接続することで平面形状のモジュールから立体形状が生成され, 接続を外すと元の平面形状に戻る。モジュールの形状を調整できる 3 つの要素を次に示す。

1) **アームジョイント**: アームには, モジュールの中心からの距離が異なる(レベルが異なる), いくつかのアームジョイントが設置されている。アームを接続する際に, モジュールの中心からの距離が遠いアームジョイントで固定するほど, 発生する引張力が大きくなりモジュールの変形が大きくなる(図 3)。

2) **アームの配置パターン**: 基本モジュールでは, 2 対の向かい合うアームを接続することで双曲放物面(図 5

の左)に近い曲面が生成される。さらに、図4のようにモジュールの中心を回転の中心としてアームの配置を30度、45度、60度回転させることで、新たに3種類のモジュールが作られる。特に、45度回転モジュールにおけるアームの配置は正方形の対角線と一致し、アームを接続すると双曲放物面に近い曲面(ただし基本モジュールから生成される曲面を水平に45度回転させたもの)が生成される(図5の中央)。30度回転モジュールと60度回転モジュールは互いに線対称であり、アームを接続すると、基本モジュールから生成される双曲放物面と45度回転モジュールから生成される双曲放物面の間隔的な形状が生成される(図5の右)。

3) アームの位置関係: 1対の接続されたアームともう1対の接続されたアームの上下関係によって、生成される立体形状は異なってくる。基本モジュールを例にとると、2対のアームの上下を入れ替えると、周縁のフレームの曲がる向きが変化し反転した形状になる(図6)。

3.3 モジュールの組み合わせ

モジュールの組み合わせは、単一モジュールの組み合わせと異なるモジュールの組み合わせの2種類に分けられる。形状変化の観察を簡単にするため、サイズを揃えたモジュールを同じ数だけ組み合わせで一列に並べ、アームの接続によって生成された各形状の差異を比較した。異なるモジュールの組み合わせは、基本モジュールを一列に並べたのち、真ん中の1枚を他のモジュールに置き換えた。

1) 単一モジュールの組み合わせ

図7は、単一モジュールの組み合わせによって生成された形状を比較している。基本モジュールの場合は、アームを接続すると自立可能なアーチ形状が生成される。30度回転モジュールの場合は、隣接するモジュールの間に30度の回転が発生し、スパイラルアーチになる。45度回転モジュールの場合は、隣接するモジュールの間に45度の回転が発生し、全体の形状は直線的な螺旋形状となる。60度回転モジュールの場合は、スパイラルアーチになり、30度回転モジュールの場合の形状と面対称になる。

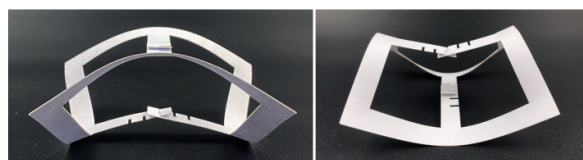


図6. アームの位置関係による変形

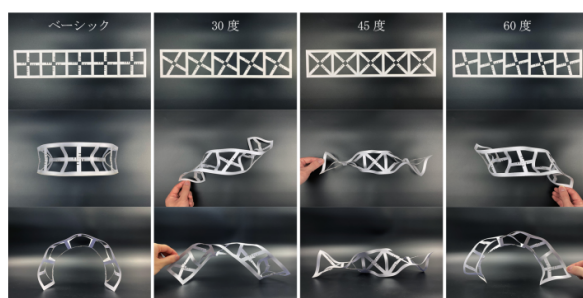


図7. 単一モジュールの組み合わせ

2) 異なるモジュールの組み合わせ

図8は、4つの基本モジュールを一列に並べたのち、真ん中に異なるモジュールを一つ挿入することで生成された、異なる3つのアーチ形状を比較している。30度回転モジュールを挿入したアーチ形状と60度回転モジュールを挿入したアーチ形状は互いに面対称になり、どちらも基本モジュールのみの組み合わせから生成されたアーチ形状と比較してねじれている。45度回転モジュールを挿入したアーチ形状は、30度回転モジュールを挿入したアーチ形状よりもさらにねじれが大きくなっている。

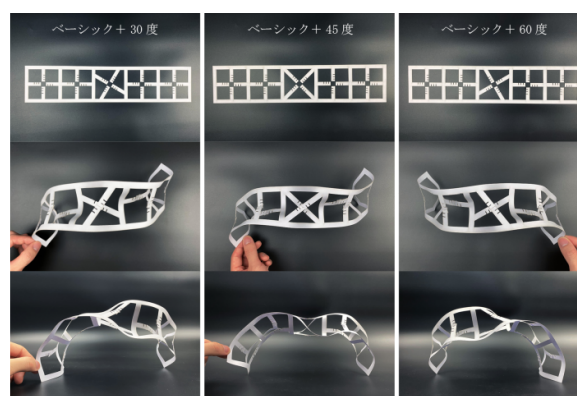


図8. 異なるモジュールの組み合わせ

4. 応用に向けたプロトタイピング

TensionModの応用に向けて、今回3つの異なるサイズでのプロトタイピングを行った。

4.1 ランプシェード

一辺70mmの30度回転モジュールの6×4個の組合せを用いて、ランプシェードを製作した(図9)。モジュールの開口部は大きいので、アームやフレームの間から光が漏れ出す。

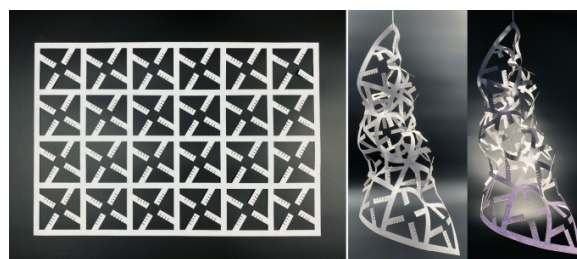


図9. 30度回転モジュールによるランプシェード

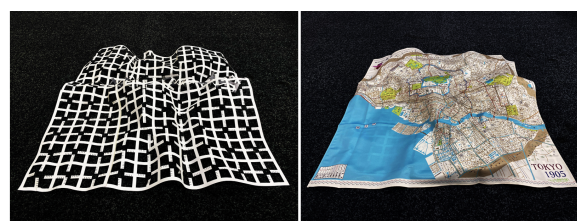


図10. 基本モジュールによる立体地図

ら光を通すことができる。ランプの明かりをある程度遮りながら、豊かな光と影を演出することができる。

4.2 立体地図

一辺 75 mm の基本モジュール 10×10 個の組み合わせを用いて、70cm×70cm の立体地図を作成した(図 10)。アームを接続する箇所を調整することで、海や山などの地形をモデル化することができる。アームを接続しなかった部分は平地になり、接続した部分は山や丘になる。図では、モジュールの組み合わせの上に布製の地図を被せているが、映像投影やモジュールに地図を直接印刷する手法も考えられる。

4.3 パビリオン

CNC 加工された 2mm 厚の合板(1.8m×0.9m)で一辺 88cm の 1×2 個のモジュールを構成し、これらを 6 枚繋ぎ合わせることで、最大で長さ約 6.8m、高さ約 2.6m のアーチを実現した(図 11)。また、各アームの接続レベルを変えることにより、アーチを多様な形状に変化させることができる(図 12)。さらに、モジュールの数や配置を変えながらアームを接続する箇所を調整することで、約 3m 四方の平面形状から、様々な人の姿勢に沿った形の構造物を構築できた(図 13)。

5. まとめと今後の展望

本稿では、レーザーカッターや CNC マシンを用いて平面素材を加工することで、張力を利用した立体造形が可能なファブリケーション手法 TensionMod を提案した。今後の課題として、造形したい立体形状に合わせてモジュール配置をシミュレーションする方法を探索する。また、モジュールを覆うことのできる伸縮可能な布製素材の開発を検討する。さらに、アプリケーションやユースケースなど、本技術の実用に向けてさらなる探索を続ける予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H05960 の助成を受けた。パビリオン製作と撮影にご協力いただいた東京大学 T-Box と Carlos Garcia-Fernandez 氏及び Ziyuan Jiang 氏に感謝する。

参考文献

1. Neil Gershenfeld, How to Make Almost Anything: The Digital Fabrication Revolution, Foreign Affairs, 91, 6, pp. 43-57 (2012).
2. Harpreet Sareen, Udayan Umapathi, Patrick Shin, Yasuaki Kakehi, Jifei Ou, Hiroshi Ishii, and Pattie Maes. Printflatables: Printing Human-Scale, Functional and Dynamic Inflatable Objects. In Proceedings of CHI '17., 3669–3680 (2017).
3. Jifei Ou, Lining Yao, Daniel Tauber, Jürgen Steimle, Ryuma Niiyama, and Hiroshi Ishii. JamSheets: thin interfaces with tunable stiffness enabled by layer jamming. In Proceedings of TEI '14. 65–72 (2014).



図 11. アーチ構造のパビリオン

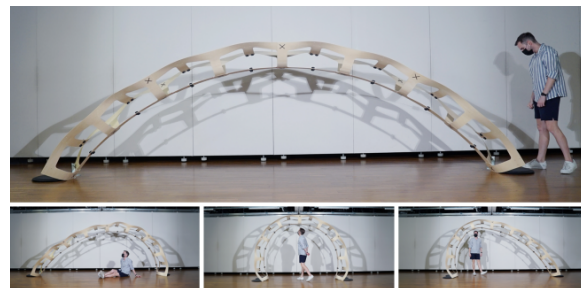


図 12. 同一平面素材から異なる曲面を造形した様子



図 13. 人の姿勢に沿った形状の構造物

4. Jifei Ou, Zhao Ma, Jannik Peters, Sen Dai, Nikolaos Vlavianos, Hiroshi Ishii, KinetiX - designing auxetic-inspired deformable material structures, Computers & Graphics, Volume 75, Pages 72-81 (2018).
5. J. I. Lipton, R. MacCurdy, Z. Manchester, L. Chin, D. Cellucci, D. Rus, Handedness in shearing auxetics creates rigid and compliant structures. Science11, 632–635 (2018).
6. Yasaman Tahouni, Isabel P. S. Qamar, and Stefanie Mueller. NURBSforms: A Modular Shape-Changing Interface for Prototyping Curved Surfaces. In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '20). 403–409 (2020).
7. Ryo Suzuki, Junichi Yamaoka, Daniel Leithinger, Tom Yeh, Mark D. Gross, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. Dynablock: Dynamic 3D Printing for Instant and Reconstructable Shape Formation. In Proceedings of UIST '18. 99–111 (2018).