

3D Printing of Flat-Folded Bistable Origami-Like Structures

Pamela Higa¹, Yiyang Jia², Jun Mitani¹

¹Tsukuba University, ²Japan Women's University

e-mail : a20061417@pucp.pe

3D printing has revolutionized manufacturing. However, its applicability has been limited due to lengthy printing times and the waste generated from the use of support materials. To address these limitations, this study introduces an approach for 3D printing of flat-folded structures. This approach utilizes bistable structures, which possess two stable states. We target structures consisting of connected bistable units. This alignment results in the formation of a tubular structure that follows a two-dimensional or three-dimensional curve. These structures have applications in product design, engineering, and architectural design. Additionally, the structures can be flat-folded and printed in this state, minimizing the use of support materials and printer space. We have demonstrated the functionality of this approach by printing models in a flat-folded state and then deploying them. To facilitate usage by designers, we have developed this system within the widely used Rhinoceros + Grasshopper environment.

Our approach is mainly based on the bistable unit structure introduced in [1]. A unit is composed of two basic bottomless quadrilateral pyramid parts with an additional strip area between them (Figure 1a and 1b). The triangles that form the pyramids are referred to as triangle building blocks (Figure 1d), which possess geometric properties that lead to bistability (Figure 1d).

In the construction process, previous studies [1] alternately use two types of units with different angles the angle θ of each unit (refer to Figure 1a), along a two-dimensional arc. This approach results in an inflatable, bistable tubular structure. However, their technique allows only arc-shaped structures. Our goal is to increase the diversity of possible designs by enabling the arrangement of units along relatively arbitrary open curves (Figure 1e) through the placing of isosceles triangles along a bezier curve.

Furthermore, to overcome the limitation of their research (i.e., only permit arc-shaped structures), we propose a new type of unit to realize the alignment of bistable units along two-dimensional curves traced on a sphere. In this manner, we can also develop intrinsically 3D tubular structures with our design system.

Additionally, a study of hinges and 3D printed methods was performed (Figure 1f). Bistable units were successfully printed, in the flat-folded state without the need for assembly afterward (see 1g and 1h).

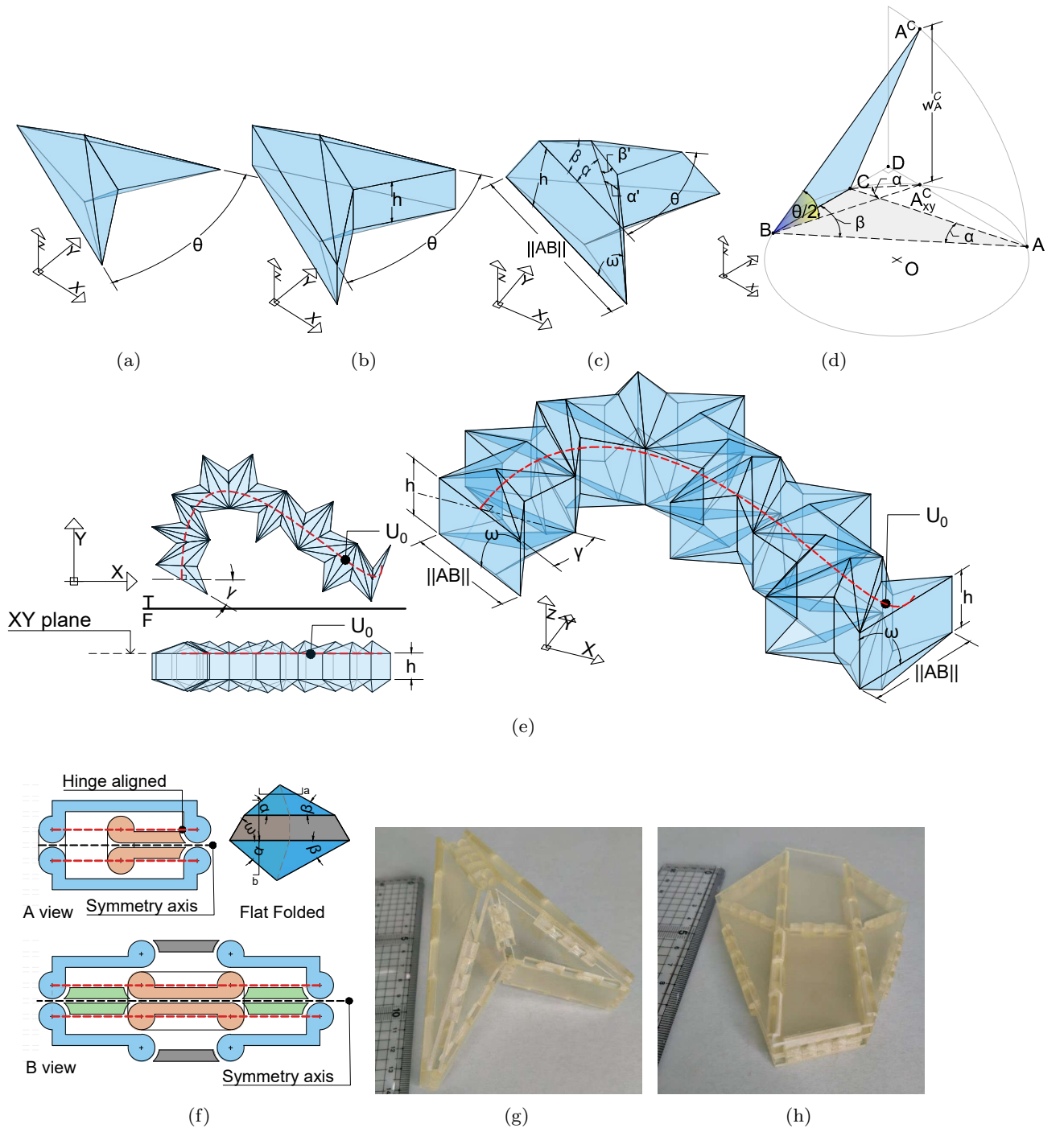


図 1. (a) The basic design of bistable units (two congruent sub-units are glued along their bottom edges). (b) A bistable unit with an intermediate rectangular connection component. (c) Design of bistable unit for the arrangement along a curve traced on a sphere. (d) Triangular building block. (e) Top, front and Isometric view of a sequence of bistable units arranged along a two-dimensional curve. (f) Sides views of the hinged bistable unit. (g) Printed model of a bistable unit, deployed. (h) Printed model of a bistable unit, flat-folded.

参考文献

- [1] D. Melancon, B. Gorissen, C. J. García-Mora, C. Hoberman, and K. Bertoldi, “Multistable inflatable origami structures at the metre scale,” *Nature*, 592 (7855), 545–550 (2021). DOI: 10.1038/s41586-021-03407-41.

ブロック折り紙の対話的な設計支援システムの提案

遠藤 匠¹, 三谷 純¹

¹ 筑波大学

e-mail : s2320573@u.tsukuba.ac.jp

1 概要

「もの」を最小単位に分割し, それらを組み立てることによって全体を作り上げるものづくりの手法は, 製造コストを抑えることができる, 容易にものづくりを行えるといった様々な利点を持つ. 折り紙にもこの手法を用いて作品を作る「ブロック折り紙」というジャンルがある. ブロック折り紙では最小単位を「ブロック」と呼び, ブロックは一枚の紙を折ることで作る.LEGO®を代表とする最小単位の組み立てによるものづくりの創作活動を計算機で支援する試みが近年盛んに行われているが, ブロック折り紙においてはこうした試みは行われていない. そのため, ブロック折り紙の創作活動は職人的技術や多くの経験を必要とする. さらに, ブロック折り紙の作品には通常数百個単位のブロックが必要であり, ブロック折り紙の試作が容易に行えない問題がある. 本研究では, 計算機上でブロック折り紙を対話的に組み立てることによるモデリングシステムを提案することで, 上記問題の解決を図る. 提案するシステムでは, 計算機上で表示されるブロック折り紙の組み上がり形状と現実で作成されるものの形状なるべく類似したものになるように, ブロックの組み上げの際に物理的な挙動を考慮する.

2 ブロックの概要

ブロックは横から見ると直角二等辺三角形の形状をしている. ブロックの部位のうち, 袋状の部位を一般的に「ポケット」と呼び, 先が分かれている部位を「脚」と呼ぶ. ブロックのポケット側の2つの頂点のうち, 直角でない方の頂点を「目」と呼ぶ. また, 直角である方の頂点をここでは「背」と定義する. 図 1-a に実際のブロックの見た目を示す. ブロック折り紙では, ブロックの脚を別のブロックのポケットに挿入することでブロックを組み立てる.

3 提案システムの概要

提案システムは C#及び Unity を用いて実装しており, システムは Unity Editor 上で実行される. ユーザーはシステム上に表示された脚を挿入するブロックを選択し, その後選択したブロックのどちらの脚を, 挿入先となるブロックのどちらのポケットに挿入するかを選択することで, ブロックの組み立てを行う. 実際のシステムの実行画面を図 2 で示す.

提案システムでは, ブロックを単純化のため直角二等辺三角形の2面とそれらを接続する四角形面(以下これを連結面と呼ぶ)1面の計3面からなるモデルとして近似する(図 1-b). 連結面はブロックの谷折り線部分を表す. また, 本システムでは紙の折り目が持つ弾性力を考慮するために, 既存の折り紙のモデリング手法 [1][2]と同様にブロック折り紙全体をバネ-質点系モデルで表現することによる物理シミュレーションを行う. 提案システムでは, ブロックの形状維持のためにブロックの稜線上に稜線の端点を質点としたバネを張り, 折り目の持つ弾性力を考慮するため, ブロックの両脚の頂点間にバネを張る. また, 複数のブロックが連結したユニオンをシミュレーションする場合, ブロック同士の相互作用を考慮する. 提案システムではブロックの挿入が発生した場合, 脚を挿入したブロックと

挿入されたブロックの質点とバネを更新する.

4 プリミティブの配置によるモデリング

ブロック折り紙では作品を作る場合, 数百個単位のブロックの組み上げが必要であり, 1 つずつの組み上げによる作品の設計には時間を要する. そこで, ブロック折り紙ではブロックを組み上げることによって出来る円柱や円錐形状 (プリミティブ) を組み合わせることで作品を作る場合があることに注目し, ユーザがシステムに入力したプリミティブをブロック折り紙で組み上げられたモデルに自動的に置換することでモデリングを行える機能を実装した.

5 今後の課題

システムのインタフェース改善を行いつつユーザテストの実施を行う. ブロック折り紙を未経験者でもモデリングが容易か, モデリングにかかる時間からシステムの有効性を評価する.

さらに, システムで設計した形状を実際に紙で作られたブロックで組み上げ, システム上で設計したモデルと実際に作成したモデルの比較を行う.

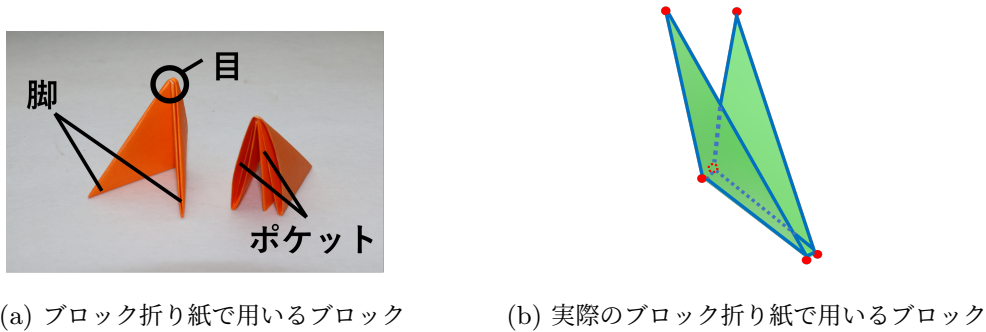


図 1: 実際に用いるブロックとシステム上で用いるブロックの比較

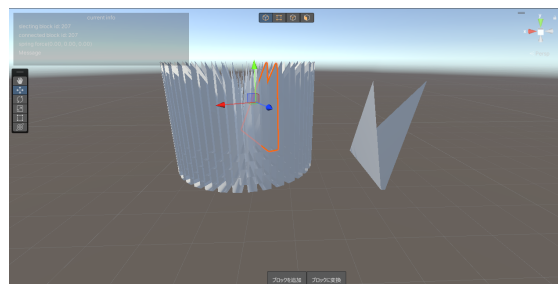


図 2: システムの実行画面

参考文献

- [1] 古田陽介, 木本晴夫, 三谷純, 福井幸男ほか. マウスによる仮想折り紙の対話的操作のための計算モデルとインタフェース. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 12, pp.3658–3669, 2007.
- [2] 田村友和, 高井昌彰, 高井那美. ユニット折り紙の対話型モデリングシステム. In IEICE Conferences Archives. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2009

ねじり折りのパラメトリックな作図法の比較

山本 陽平¹, 三谷 純²

¹ 高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 ² 筑波大学情報システム系

e-mail : yyamamoto@kochi-ct.ac.jp

1 序論

ねじり折りとは、複数の多角形面をねじりながら1枚の紙を平坦に折りたたむ方法である。その展開図を作図する方法として、平面グラフとその双対グラフをパラメトリックに変換する手法が知られている。一方、山本が提案した「ねじり作図法」は、そうした手法を用いずに、同様のパターンを作図できる [1]。この作図法は、他の作図法と比較して広い設計空間を持つことが示されているが、その他の点については十分に比較されていない。本報告では、ねじり作図法を平面グラフとその双対グラフを変換する作図法として再解釈できることを示す。また、この方法が、既存の作図法である Shrink-Rotate Algorithm の特徴を持つことを示す。なお、展開図とは、「内部頂点周りの1つおきの内角の和が π となる (川崎の条件)」を満たす折り線の集合とする。

2 再解釈されたねじり作図法

ねじり作図法は、三角形面で構成された平面グラフを、その双対なグラフとパラメータを用いて、三角形のねじり折りのパターンへと変換する。双対なグラフは、平面グラフの2つの面が共有するエッジと、それに双対なエッジが直交するものに限られる。双対なグラフの自己交差は問わないため、条件を満たすものは必ず存在する。

まず、平面グラフの i 番目のエッジを E_i とする。 E_i と同一直線上に、 E_i を持つ面と双対な頂点から垂線を降ろす。それらの交点は、 E_i を $e_i : 1 - e_i$ で内分もしくは外分する。次に E_i 上へ、基準線と名付けた線分 $\overline{r_i s_i}$ を配置する (図 1B)。すべての基準線の長さは E_i の長さを w 倍 ($w > 0$) した値とする。各基準線は、 E_i を $e_i : 1 - e_i$ で内分もしくは外分するように配置される (e_i 側の E_i の端点を v_i , 基準線の端点を r_i とすると、 v_i と r_i の距離が E_i の長さを $(1 - w)e_i$ 倍した値となる)。そ

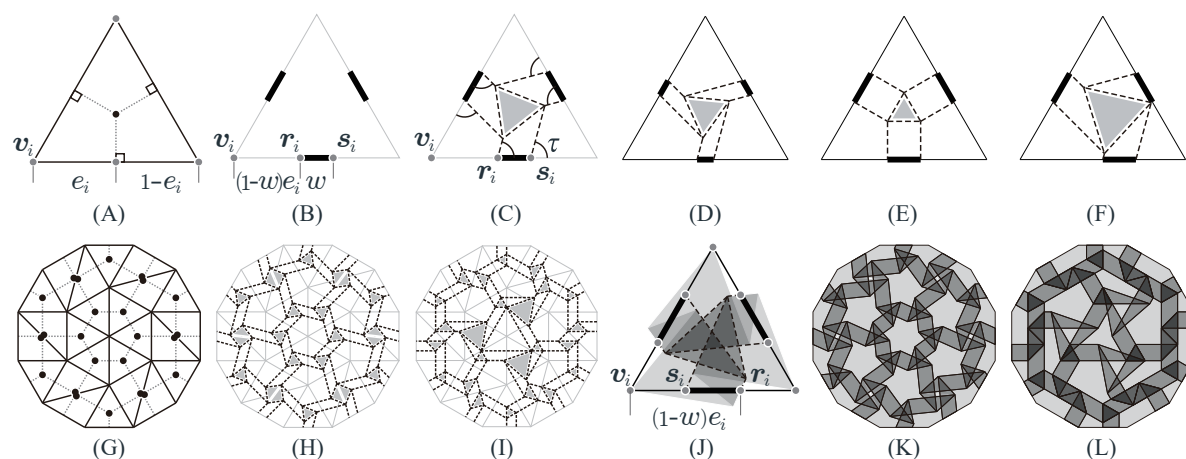


図 1. A: 単一の三角形面から成る平面グラフと双対な頂点, B: 基準線の配置, C: 折り線の作図, D: C の w を操作した例, E: C の τ を操作した例, F: C の e_i を操作した例, G: 一般的な平面グラフと双対な頂点, H: G の e_i を操作せずに生成した例, I: G の e_i を操作して生成した例, J: 折りたたまれた C の近似形, K: 折りたたまれた H の近似形, L: 折りたたまれた I の近似形

して、基準線の端点を通り、基準線と角度 ρ を成す折り線を作図する (ρ は共通の値を用いる). 三角形面ごとに、その折り線の交点を結ぶ折り線を作図すると、折り線に囲まれた三角形の面と、その各辺から平行な折り線が延伸する三角形のねじり折りのパターンが得られる (図 1C). 各パターンは、 e_i や w, τ を操作することで、異なるものへとパラメトリックに変形できる (図 1D,E,F). 隣り合う 2 つの面から生成されるパターンは、基準線ならびにその端点を通る折り線を共有する (図 1H,I).

3 Shrink-Rotate Algorithm との比較

Shrink-Rotate Algorithm は、凸多角形面で構成された平面グラフから、ねじり折りのパターンを作図する [2]. 作図されたパターンには、平面グラフの各面を、双対なグラフ (ねじり作図法と同様の条件をみたすもの) の頂点を中心に共通のパラメータを用いて収縮・回転させられたものが含まれる. また、収縮と回転のパラメータを操作することで、作図された展開図を折りたむことで得られる形の近似形 (実際のものよりも大きなスケールで、境界を除いた形を再現したもの) を生成できる.

再解釈されたねじり作図法を、この手法と比較することで、次の 2 点が明らかとなった.

- 1) Shrink-Rotate Algorithm で作図された展開図は、(三角形分割された) 同様の平面グラフと双対グラフを使ったねじり作図法でも生成できる.
- 2) ねじり作図法も、パラメータ (w, τ) を操作して、折りたたまれた形の近似形を生成できる.

図 1H は (1) の例でもあり、どちらの作図法を使っても図 1G から作図できる. 一方、図 1I のように e_i を操作して得られた展開図は、Shrink-Rotate Algorithm で作図できない. (2) の近似形は、元の展開図の生成に用いられたパラメータをそれぞれ w_{CP} と τ_{CP} とした上で、

$$w = -w_{CP}/(1 - 2w_{CP}) \quad \tau = \arctan((1 - 2w_{CP}) \tan \tau_{CP}) \quad (1)$$

を設定することで得られる (図 1J,K,L). この場合に限り w は負の値となり、基準線の端点は逆転したものと扱われる (図 1J).

4 今後の課題

ねじり作図法は、一般的な平坦折可能な展開図をねじり折りのパターンとみなして作図することができる. そのため今後は、ねじり作図法と、これまでねじり折りのパターンと見なされなかった展開図を作図する手法の過程や幾何的な特性を比較する.

謝辞 本研究は,JST,CREST,JPMJCR1911 の支援を受けたものである

参考文献

- [1] Yamamoto, Yohei, and Jun Mitani. "Continuous deformation of flat-foldable crease patterns via interpretation as set of twist-patterns." Journal of Computational Design and Engineering 10.3 (2023): 979-991.
- [2] Bateman, Alex. "Computer tools and algorithms for origami tessellation design." Origami3: Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education. 2002.

Parameterized Folded State Shape Modeling of David Huffman's Ellipse

Safari Aida¹, Shafieasl Hamid², Mitani Jun¹

¹ University of Tsukuba, Japan,

² Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran,
e-mail: aidahelix29@gmail.com

1. Introduction and Methodology

This research aims to replicate David Huffman's curved crease design of ellipses with two degree-two vertices, using Grasshopper as a modeling tool. The intention is to explore its application as an architectural concept across various design elements. Drawing methods and approaches from prior studies on structural modeling, this research seeks to enhance the Grasshopper model by incorporating user input capabilities. These features will allow users to manipulate the parameters and constraints of the ellipse design, thereby gaining insights into the folding motion and the three-dimensional structure of the model more interactively and comprehensively.

The very first step in our method is to define the crease pattern. Figure 1 shows the original crease pattern and 3D origami shape of David Huffman's design with ellipses[1] and Figure 2 shows the crease pattern division.

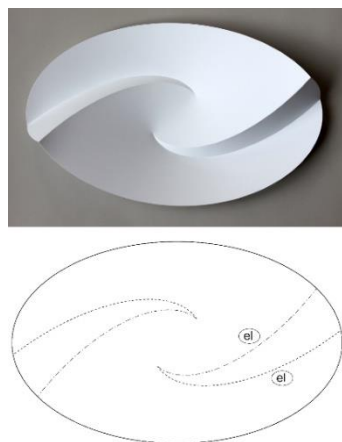


Fig 1. Huffman's design with ellipses[1].

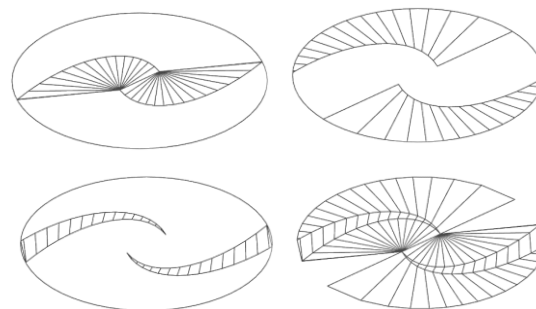


Fig 2. Crease pattern division.

Our methodology consists of several key steps to create a 3D model from an ellipse pattern on paper. First, we define the initial 2D crease pattern. Next, we divide the unfolded flat plane into different regions. These regions consist of four-sided shapes (quadrangles), similar to puzzle pieces attached.

Next, we examine the pattern to construct the 3D model. We calculate the 3D coordinates of each point where the folds intersect, treating these points as the corners of the puzzle pieces. The ultimate 3D model is constructed by dividing the regions on

the unfolded pattern and calculating the 3D coordinates of each constituent vertex. When once the fold angle of an edge is determined, the positions of the other vertices can be determined based on it. Knowing the fold angle value allows us to determine the positions of the other points. As the last step, we allow the user to specify the angle of the first fold, which helps determine the overall shape of the 3D model as shown in Figure 3. This process is the same as allowing someone to create the first puzzle piece and asking them to complete the rest based on that initial piece.

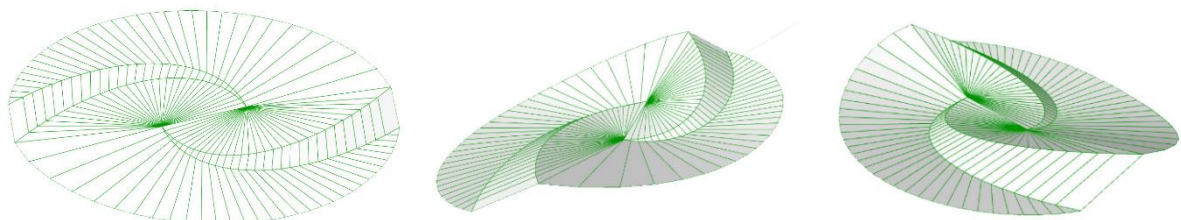


Fig3. Final renders of the 3D structures with different parameters.

1.2 Conclusion

In conclusion, we have successfully developed a system to visualize shape changes of Huffman's ellipse depending on parameters, such as size and fold angle, offering significant flexibility in design customization. Additionally, the module is fully compatible with CAD environments, allowing it to be seamlessly integrated into architectural projects as a unique design element. With the digital design phase now complete, we plan to proceed with the prospect of creating a physical model in the future, which will further bring this innovative concept to life.

This work was supported by JST CREST Grant Number JPMJCR1911, Japan.

参考文献

- [1] E. D. Demaine, M. L. Demaine, and D. Koschitz, "Reconstructing David Huffman's legacy in curved-crease folding," *Origami* 5 (2011): 39–52.
- [2] L. H. Dudte, G. P. T. Choi, and L. Mahadevan, "An additive algorithm for origami design," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118 (21), e2019241118 (2021). DOI: 10.1073/pnas.2019241118.