MIMS現象数理学拠点共同研究集会 (ハイブリッド, Zoom 会議)

「折り紙の科学を基盤とするアート・数理および折紙工学への応用 Ⅲ」

2022年12月16日 (金) - 17日 (土)

プログラム(Program 2022/12/05 版)

ページ

1

16日(金)

9:50 – 10:00 開会 (Opening)				
10:00 – 10:30 三谷 純 (Jun Mitani, 筑波大)	2			
「大学の授業科目としての折紙の科学」				
10:30 – 11:00 繁富 香織 (K aori Shigetomi, 北海道大)	3			
「折り紙を用いた Creative Thinking」				
11:00 – 11:30 戸倉 直 (Sunao Tokura, 株)トクラシミュレーションリサーチ)	4			
「円筒ハニカム構造体の衝撃エネルギー吸収性能評価および塗装シミュレーション」				
11:30 – 12:00 Jason Ku (The National University of Singapore (NUS))	5			
Computing Folded States				
~昼休み~				
13:15 – 13:30 山崎 桂子 (K eiko Yamazaki, 明治大)	6			
「折紙構造による音響空間の開発のための音響解析シミュレーション」				
13:30 – 13:45 佐々木 淑恵(T oshie Sasaki, 明治大)	7			
「安全な折紙輸送箱のための応答曲面法最適化とエネルギー密度最適化法の融合に関する研究	究」			
13:45 – 14:00 阿部 綾 (Aya Abe, 明治大)	8			
「折紙コアへの適用のための振動・音響連成下の室内騒音低減検討」				
14:00 – 14:30 岩瀬 英治 (Eiji Iwase, 早稲田大)	9			
「折り紙や切り紙を用いた伸縮電子デバイス」				
14:30 – 15:00 米田 大樹 (Taiju Yoneda, 九州大)	10			
「柱状生物の脱皮としわの形成 ー ヘビ、イモムシ、それから靴下」				
15:00 – 15:30 斉藤 一哉 (Kazuya Saito, 九州大)	11			
「昆虫の翅に関する生物模倣工学について」				
~休憩(30 分間)~				

16:00 – 17:00 特別招待講演 (Special invited talk): Zhong You (Oxford University) 「Compact Folding of Flat Arrays Composed of Panels with Uniform Thickness」

17日(土)

10:00 - 10:30	舘 知宏(Tomohiro Tachi, 東京大)	12
	「自己組織化による曲線折紙」	
10:30 - 11:00	鳴海 紘也(K oya Narumi,東京大)	13
	「折紙の折紙による折紙のためのインタラクティブファブリケーション」	
11:00 - 11:30	買 伊陽 (Yiyang Jia, 成蹊大)	14
	「地図折りの行列演算子代数の構築および圏論視点からの考察」	
11:30 - 12:00	寺田 耕輔(Kosuke Terada, 明星大)	15
	「折紙工法を活用した構造体の圧潰特性」	

~昼休み~

13:15 – 13:45 ルイス ディアゴ (Luis D. Diago, 明治大)	16
[3D Printing with Kirigami Honeycombs]]	
13:45 – 14:15 萩原 一郎 (Ichiro Hagiwara, 明治大)	17
「ハニカムコアをしのぐキュービックコアの発明と応用展開」	
14:15 – 14:45 上原 隆平 (Ryuhei Uehara, JAIST)	18
「単純折りモデルにおける一刀切り問題の最適解に関する研究」	
14:45 – 15:15 伊藤 大雄 (Hiro Ito, 電気通信大)	19
「平行山谷付き平坦折り問題(その3)」	

~休憩~

15:30 - 16:00	宮本 好信(Yoshinobu Miyamoto , 愛知工大)	20
	「四節球面機構と単頂点剛体折紙の対応のデザイン応用」	
16:00 - 16:30	松原 和樹(Kazuki Matsubara,埼玉大)	21
	「剛辺数に着目した多面体の連続的平坦化問題(Ⅱ)」	
16:30 - 17:00	奈良 知惠(Chie Nara,明治大)	22
	「超立方体の連続的折り畳みとひし形の翼折り」	

17:00-17:10 開会 (Closing)

組織委員:奈良知惠 (Chie Nara, Chair), 萩原一郎 (Ichiro Hagiwara), 上原隆平 (Ryuhei Uehara), 三谷純 (Jun Mitani), 舘知宏 (Tomohiro Tachi), 侯野博 (Hiroshi Matano)

特別招待講演 Zhong You 教授(オックスフォード大学)

Dr Zhong You is currently a Professor of Engineering Science at the Department of Engineering Science, University of Oxford. He is also a Fellow of Magdalen College. Zhong obtained his BS from Shanghai Jiaotong University, and MS from Dalian University of Technology, and Ph.D. from Cambridge University. He serves on the editorial board of some renowned journals, including ASME Journal of Mechanisms and Robotics (Associate Editor), Scientific Report and IMechE Journal of Mechanical Engineering Science Part C. Zhong's research is concerned with the design and realisation of novel deployable and origami structures, a type of unconventional structures capable of large shape changes. He has published many ground-breaking research papers in prestigious journals including SCIENCE and PNAS. His work was selected for the Science Day Exhibition at Buckingham Palace in 2007, organised by the Royal Society. SCIENCE introduced Zhong's research work in their "profile" section. In addition, he developed a flow diversion stent to treat cerebral aneurysms. Oxford Endovascular, a university spin-off company, was founded to commercialise this technology.

Compact Folding of Flat Arrays Composed of Panels with Uniform Thickness

Zhong You Professor of Engineering Science Department of Engineering Science University of Oxford Parks Road, Oxford, OX1 3PJ, UK Email: zhong.you@eng.ox.ac.uk

Many aerospace arrays have large flat profiles composed of regular polygonal panels. They need to be packaged into small volumes for launch, and subsequently deployed to seamless flat surfaces once in orbit. Examples of such structures include solar arrays and reflectarray antennas, which are made from rigid thick panels. It is very challenging to package such arrays compactly without any voids, especially when they are composed of panels with uniform thickness and are designed to have bi-directional deployment with a small number of degrees of freedom. In this talk, I shall demonstrate a kirigami based approach that enables compact folding of such arrays without any voids.

Origami and kirigami have great advantages in folding large thin sheets into compact volumes. However, when thick panels are involved, origami based approaches often lead to large gaps or uneven surfaces in deployed arrays. In the newly proposed approach, a thick-panel deployable kirigami is first introduced using the Hamitonian circuit. This approach is then used to create an eight-panel element with shapes of isosceles triangles and parallelograms that are connected together by revolute joints. Four such elements are then coupled together to form a deployable unit with a single degree-of-freedom. These units can be tessellated to create large arrays of any dimension, and these arrays can always be folded into compact stacks without any void. Although slits are introduced in the tessellation to accommodate thick panels during the folding process, they are completely closed in the fully deployed states.

大学の授業科目としての折紙の科学

筑波大学 三谷純

概要:

折紙は数学および工学など理工系の学問領域に密接に関係し、その応用は教育、芸術、医療分野など も含む広範に及ぶ。OSME (International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education) のような折紙研究に関する国際会議では、異分野の研究者が折紙を1つの共通ワードとして学際的な 交流を行うことができる稀有な会議となっている。このように、幅広い分野に折紙が関わる一方で、折 紙そのものについて体系的に学ぶ機会は乏しく、とくに大学での授業科目として、折紙を対象とした 正規科目というものはあまり見かけない。

本発表では、慶應義塾大学の総合政策・環境情報学部(湘南藤沢キャンパス)にて、2022 年度秋学 期に「基礎科目・データサイエンス科目・データサイエンス2」分野の2単位正規科目として開講さ れることになった「折紙の科学」の内容について紹介する。本科目の定員は100名としたが、事前の 履修希望者は271名あり、学生の関心の高さがうかがえる。シラバスは表1に示すとおりであり、折 紙の、おもには理工系に関する事項全般を体系的に学べるように意識して組み立てた。また、各回には 紙を実際に折る体験をする時間を設けるものとした。本稿執筆時現在、まだ第7回の授業を終えたと ころであるため全体の総括はできないが、総じて受講生の反応は好ましいものであると感じている。 受講生には、折紙の数理および工学的な側面を学ぶとともに、それを応用できる能力を身につけるこ とを期待している。

П	テーマ	キーワード	内容
1	折紙の科学概説	折形、タトウ、秘伝千羽鶴折形、連鶴、 折紙設計、近代折紙の流れ、工学分野へ の応用事例	現代では origamiという語が、紙を折って形をつくることを表すものとして世界中で使われている。薄い素材を折ることで形を作ること ができるorigamiの技術は、工学、医療、数学、アート、教育と幅広い分野で研究対象とされている。第1回目にあたる、この講義では、 日本で古来より親しまれてきた折紙が、現在の科学分野における対象となるまでの歴史を俯瞰する。
2	平坦折りの幾何(1)	展開図、2色色分け、局所平坦折り、大 域的平坦折り、前川定理、川崎定理	紙を折った後に開いてもとの状態にすると、紙の上には折り跡が残る。この折り跡から、折った後の形を作るために使用されたものだけ を取り出したものを展開図と呼ぶ。第2回目の講義では、平坦に折る折紙と展開図の関係について学び、局所平坦折り条件を理解する。 また、計算科学分野で研究の対象とされている、大域的な平坦折り可能性を判定する問題について学ぶ。
3	平坦折りの幾何(2)	折りの公理、角の3等分、3次方程式、N 等分、折りの収束、オリガミクス	紙を折る操作を、平面に折り目を付ける操作であると見なすと、折紙は平面幾何の作図法と密接な関係がある。本購養では、折りの公理 から始まり、折り操作で可能な作図が、コンパスと定規で行う作図よりも広い範囲の図形を対象とできることを学ぶ。また、折り操作で 3次方程式が解けることや、折り操作の繰り返しによる漸近法による線分のN等分の理論などを学ぶ
4	折紙設計理論	ツリーメソッド、サークルパッキング、 Box pleating、ジャパラ、折紙設計、	意図した形状をシステマティックに折り出す設計理論について学ぶ。とくに、対象物の骨格に注目した、uni-axial 構造の設計に用いら れる tree メソッドを学ぶ。また、平坦折り可能なパターンの組み合わせで作り出されるテッセレーションについても学ぶ。
5	招待講演(1)	パイオミミクリー、昆虫の翅の折りたた み構造	九州大学の斉藤一哉講師に、生物から学ぶ折りの構造について講演いただく。工学分野では、自然界や生物に見られる構造から知見を得 ることを目指すパイオミミクリーという概念に基づく研究がさまざまに行われている。本講義では、昆虫ハネカクシの翅の折りたたみ や、テントウムシの翅の構造と、折り紙の関係について知ることで、自然界にも様々な折りたたみの仕組みが存在することを学ぶ。
6	折りとフォルム	折りの基本的なパターン、並進、シンメ トリ、ユニット折り紙	日本に伝承的に伝わる折紙や、遊戯的な折紙の造形だけでなく、折紙は1つのアートとして、芸術や建築、ファッション分野でも注目さ れている。折ることで生まれる幾何的な美と、シンメトリを活かしたデザインについて、体験を通して様々なフォルムの創出方法を学 ぶ。
7	剛体折り	剛体折り、ミウラ折り、ショッピング バック問題、工学分野への応用	使いパネルをヒンジで連結したもので折紙をモデル化したものを剛体折紙と呼ぶ。剛体折紙はリンケージと同等の機構を持つものとみな すことができ、剛な構造を変形できるという機械工学分野に有益な特徴を持つ。とくにミウラ折りは1自由度の剛体可折パターンとし て、さまざまな場面で活用されている。本講義では、剛体折紙の幾何学的な制約と、工学分野への応用について学ぶ。
8	立体折り紙	軸対称性、可展条件、離散ガウス曲率	紙を折ることで多面体または曲面からなる立体表面を形作るためには、対象となる曲面の任意の点においてガウス曲率がゼロである必要 がある。このような制約を満たす可展面の性質について、連続曲面と離散曲面の両方の視点から学習する。
9	曲線折り(1)	軸対称折紙(ORI-REVO)、キャンディ ラッピング、鏡映反転	可展面に対して折りを加えることで、曲線での折り目を持つ造形を生み出すことができる。このような曲線での折りについて、その幾何 的な性質を学ぶ。また、回転対称性を与えることで、断面形状から立体折紙の形状をパラメトリックに生成可能なことを学ぶ。
10	曲線折り(2)	折紙シミュレータ、曲線折りのパター ン、ピローポックス	実現可能な曲線折リパターンについて学び、現知のパターンを組み合わせることで、新しい造形を生み出す手法について、体験を通して 学ぶ。
11	招待講演(2)	地図折り問題、格子パターン、計算量、 NP困難性	成蹊大学の賈伊陽助教に、平坦折り可能性判定問題の数理について講演いただく。一般的に、NP困難であると知られている大域的な平 坦折り可能判定問題に対して、展開図に与える制約と計算量の関係、および、判定に用いられるアルゴリズムなど、平坦折り折紙に関す る各種の数学的な話題を提供いただく。
12	数学分野の諸問題		折紙と数学の関係は深く、これまでに最適化問題、作図可能数、数論、微分幾何、多面体、ベクトル、解析、位相幾何学、グラフ理論、 オイラーの公式、ハミルトン閉路、数え上げ、フラクタル、組み合わせ論、巡回群、線形代数、球面三角法と言った、さまざまな領域に わたる問題が示されている。このような、折紙に関わる多分野にわたる折紙の問題の事例を通して、折紙の可能性について学ぶ。
13 14	折紙先端技術(1)		近年の国際会議などで発表された、折紙の先端技術について紹介する。現在、諸分野において、折紙がどのように研究対象となっている かを、幅広く知る。
15	まとめ		

表1 「折紙の科学」のシラバス

Computing Folded States

Jason S. $\rm Ku^1$

A *flat-folded* state of an origami crease pattern is a folding along specified creases into the plane, and a layer-order defined on every pair of overlapping faces that (1) respects any mountain/valley assignment, and (2) obeys the antisymmetry, transitivity, consistency, and non-crossing conditions defined in [1, Section 11.4]. We only discuss folded states that fold flat, so we drop the 'flat-' prefix throughout. Deciding whether a crease pattern admits any folded state is known to be NP-hard [2], while some crease patterns admit an exponential number of folded states, see Fig 1.

There are multiple existing software that can compute one or more folded states of a crease pattern, including Oripa [3], Orihime [4], and Oriedita [5]. These software all generally follow the algorithm described by [6] to compute folded states: (1) construct an overlap graph of cells, where each cell is a maximal region of the folded image that overlaps the same set of crease pattern faces, and (2) find a linear order of faces within each cell that avoids selfintersection of the paper. This algorithm is straight forward, and necessarily requires exponential time to compute an exponential number of folded states.

An alternative algorithm constructs a bipartite **con**straint graph on the set of pairs of faces that overlap (variables that must be assigned a Boolean order), and the set of transitivity, consistency, and non-crossing conditions that must be satisfied (constraints), with edges connecting each constraint to its associated variables.

Theorem 1 The constraint graph for a crease pattern with n faces has complexity $O(n^3)$ and can be constructed in $O(n^3)$ time.

Corollary 2 The layer order of a given folded state can be verified in $O(n^3)$ time.

To find valid layer orders (i.e., valid assignments of the variables), first assign each variable corresponding to a pair of faces that bound a mountain/valley assigned crease (crease assignment implies layer order). When a variable is assigned, check whether any of its adjacent constraints are violated (i.e., no valid assignment exists), or whether any variable assignment can be inferred from the constraints. This *initial assignment* stage can be computed in time linear in the size of the constraint graph via breadth-first-search. For crease patterns that have a unique folded state, this stage may fully compute the layer order in $O(n^3)$ time.

If there are still unassigned variables after initial assignment, one can compute all possible valid layer orderings in exponential time by checking the $2^{O(n^2)}$ possible remaining variable assignments (layer orders), each in $O(n^3)$ time. However, for many crease patterns, we can speed up the search by identifying groups of variables that are assignable independently from each other. After initial assignment, remove all assigned variable vertices from the constraint graph to form the **pruned constraint graph**, which may



Figure 1: (a) A generalizable crease pattern with 2k+1 = nfaces (k horizontal flaps and k vertical flaps) with exactly $2^{(k^2)} = 2^{\Theta(n^2)}$ valid folded states. The pruned constraint graph has k^2 connected components, each of size 1, allowing an implicit representation of all folded states to be computed in $O(n^2)$ time. (b) A depiction of the constraint graph variables: variables assigned in the initial assignment stage are colored light green, with the other variables colored according to their pruned constraint graph component. (c) and (d) depict two valid folded states.

be disconnected into multiple components containing variables that are assignable independently from each other.

These components are often small, so an exponential search on each one will be much faster than an exponential search on the whole graph. Once all assignments for each component are enumerated, one can list all folded states by computing the Cartesian product of the assignments from each component; or one can count the total number of folded states by multiplying the number of assignments found for each component. Storing only the assignments for each component provides an implicit representation of all folded states, which can represent an exponential number of folded states in polynomial space. See Fig 1 for one such example.

Theorem 3 All folded states of a crease pattern with k pruned constraint graph components having sizes s_1, \ldots, s_k , can be implicitly computed in $O\left(n^3 + \sum_{i=1}^k s_i^3 \cdot 2^{s_i}\right)$ time.

This algorithm has also been implemented (somewhat inefficiently) in a web application called *flat-folder* [7]. A primary motivator for the development of this algorithm and software is to generate folded states in FOLD format [8] as test case input for future origami simulation software.

References

- [1] E. D. Demaine and J. O'Rourke, *Geometric folding algorithms: linkages, origami, polyhedra.* Cambridge university press, 2007.
- [2] H. A. Akitaya, K. C. Cheung, E. D. Demaine, T. Horiyama, T. C. Hull, J. S. Ku, T. Tachi, and R. Uehara, "Box pleating is hard," in Japanese Conference on Discrete and Computational Geometry and Graphs, pp. 167–179, Springer, 2015.
- [3] J. Mitani, "Oripa main page." https://mitani.cs.tsukuba.ac. jp/oripa/. Accessed: 2022-11-28.
- [4] T. Meguro, "Orihime main page." http://mt777.html.xdomain. jp/index.html. Accessed: 2022-11-28.
- [5] Github Contributors, "Oriedita main page." https://oriedita. github.io. Accessed: 2022-11-28.
- [6] J. Mitani, "The folded shape restoration and the rendering method of origami from the crease pattern," in Proc. Int. Conf. on Geometry and Graphics, pp. 1–7, 2008.
- [7] J. S. Ku, "Flatfolder main page." https://github.com/ origamimagiro/flat-folder. Accessed: 2022-11-28.
- [8] E. D. Demaine, J. S. Ku, and R. J. Lang, "A new file standard to represent folded structures," in *Abstr. 26th Fall Workshop Computat. Geometry*, pp. 27–28, 2016.

¹Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, jasonku@nus.edu.sg

折紙構造による音響空間の開発のための音響解析シミュレーション

山崎桂子*1,橋口真宜*2,萩原一郎*1

*1明治大学,*2計測エンジニアリングシステム株式会社

コロナ禍を契機として自宅滞在時間が増加し、自宅での騒音に対する手段が望まれるようになってい る.音楽を演奏したり歌を歌ったりなどする機会が増えている(1)ことからその音への対策、またリモー トワーク時の家族間もしくは近隣住民とのトラブル対策として、防音ツールのニーズがあるものの、本 格的な防音室の導入は設置場所及びその設置費用の関係で容易ではない.そこで、本研究では、防音室 ほどの機能までは持たないものの、比較的安価で折り畳み収納が可能であり、内部の空間の大きさと残 響時間が演奏に適したものであり、かつ外部への音を居住地域の騒音基準値である 55 dB(昼間)(参考 45dB(夜間))まで下げられる減音シェードの開発に取り組む.通常このような製品の開発には多くの試 作と検証が必要となるが、本研究では有限要素解析(FEM)を活用することで、試作品を大量に制作する ことなく最適な素材、形状の減音シェードを得ることを目的とする.

既に他社から発売されている簡易防音ツールは全て直方体であるが、その形状を円柱や反転らせん構 造等に変更することでシェード内外の音圧にどの様な変化があるのか調べ、さらに、それらの形状の改 良のヒントとすべく、音響管を用いたコアの透過損失についてシミュレーションを行って検討をした.



図2. 直方体形状に関する解析の画像表示: (a) 解析対象の音源とメッシュ, (b) 音圧分布, (c) フォン・ミーゼス応力, (d) 音圧の断面表示



図3. シェード内(音源真上及び30センチ離れた場所)とシェード外の音圧

安全な折紙輸送箱のための応答曲面法最適化と エネルギー密度最適化法の融合に関する研究

○佐々木 淑恵(明治大学)楊 陽(明治大学) 萩原 一郎(明治大学) Toshie Sasaki Yang Yang Ichiro Hagiwara

エネルギー密度位相最適化法は、各固有モードのマスの部分とバネの部分をそれぞれ運 動エネルギー密度分布, ひずみエネルギー密度分布から抽出し, 固有周波数を上げる場合に はバネ部に補強、マス部に穴、下げる場合にはバネ部に穴、マス部に補強を設ける制御方式 である. 固有角振動数は, 等価剛性と等価質量によって決定されるという振動の原点に戻る ことで考案した. 折紙輸送箱の基本検討のため, 段ボール矩形板で, 傷み易い周波数帯域を 危険周波数帯域と称し、この危険周波数帯域から共振周波数を移動する問題を取り上げる. 拘束条件を単純支持にして、固有値解析を行い、エネルギー密度分布を計算すると図1が得 られる. 20Hz から 40Hz までを危険周波数帯域とし,本手法で検討した. これは,図2に示 すように従来の密度法トポロジー最適化法で収束しない問題で,これまで,何故収束しなか ったかは不明であったが、本手法を用いるとその理由が分かることを示す.更に、 収束可能 な課題設定に直すこともできる. すなわち、図3に示すように補強までを含めて固有周波数 の移動を行うと目標をクリアすることがわかる、穴の寸法や補強の厚さを定量的に得るた め,応答曲面法などの手法を取り入れた.また,複数のコアを有す折紙輸送箱への適用の為, まず、図4で示すように本手法を一つのコアに適用した例も示す.



図 1 矩形板の固有周波数とエネルギー密度分布 上:ひずみエネルギー密度(バネ) 下:運動エネルギー密度(マス)



図2:上段左:従来最適化 固有周波数:12.14Hz,22.29Hz,36.76Hz,40.11Hz 上段右:エネルギー密度位相最適化 固有周波数:10.94Hz,20.45Hz,31.64Hz,37.89Hz 下段:上段右の形状におけるエネルギー密度分布 これ以上,3次の固有周波数を上げることができないことを示す.数:90.98Hz,144.9Hz,237.1Hz,237.1Hz



図 3 左:補強(3mm)を含めた固有周波数制御 固有周波数: 7.91Hz,9.07Hz,40.58Hz,42.78Hz でクリア 右:さらに MPOD 法を使い補強部の最適化を行う



図 4 トラスコア形状モデルの固有周波数制御

- 7次固有周波数を90Hz以上にする.
- 上:固有周波数とエネルギー密度分布
- 下:最適化前の形状と最適化後の形状 最適化後固有周波

折紙コアへの適用のための振動・音響連成下の室内騒音低減検討

阿部綾、楊陽、萩原一郎(明治大学)、米大海(計測エンジニアリング)

1 概要

室内騒音特性は商品性に大きな影響を与えるため、モード解析始めそれを利用した区分モード合 成法など多様な技術が検討開発されてきた.しかし設計段階で使用される騒音低減技術は、問題と なる周波数範囲での乗員耳位置の騒音レベル積分値の最小化の1パターンである.どの部分を補強 すべきかの結果が得られてもなぜそうなったかの因果は不明である.それに対し新たに開発した共 振周波数のひずみ・運動エネルギー密度分布の情報からの対策は因果が分かり、しかもこれまで以 上に優れた結果が得られることを示す.

2 固有モードの歪及び運動エネルギー密度分布をベースとした位相変更による新しい高速・高効率 固有値制御法

本手法は,各固有周波数は,等価質量と等価剛性で決まるため,固有周波数を上げたい場合は,バネ部 を補強するか,マス部に穴を空ける.逆に固有周波数を下げる場合は,バネ部に穴を設けるかバネ部を 補強して位相を変化させるものである[1].固有値制御で最も期待されるのは,位相最適化法であり,著 者の一人萩原は,均質化法や密度法による位相最適化解析を振動問題に適用しているが,実際の設計 にまで持っていくのは極めて難しい.それは,最適化で得られるのは,板厚分布のあるものであり,その 製造は困難だからである.そこで,ある閾値を設け,それ以下の要素に穴を設けることがなされるが,そ の時点で折角の収束値からずれてしまう.また,課題設定によっては勿論収束が困難である.これらを 解決すべく開発したのが,本手法である.インタラクティブに極めて効率よく複数の大幅な変更を司 ることができることが示された.

3 解析モデルとシミュレーション

図1に示すトラックキャビンモデルでフロア中心点に垂直上方向に加振しドライバー耳位置の音 圧低減を図ることを問題に設定する.先ず,シェル-音響連成計算を検討し,ダンピング(制振)設 定値(3.5%)の妥当性を確認し,次に従来手法により最適化を行う.その後,以下の条件によりエネル ギー法ベース最適化を検討し,図2に示すように従来手法よりも4.4%改善する結果が示された. 目的関数:耳位置音圧の指定周波数域の積分値の最小化

制御変数:板厚(0.3mm, 2mm, 4mm の 3 ケース)

手順:以下を数回反復する.

「固有周波数計算実施⇒エネルギー分布プロット⇒板厚調整⇒直接周波数応答で 50~60Hz 内耳位 置音圧積分値確認」



4 結語

室内騒音低減の最適化として,注目する周波数帯域内の乗員耳位置の音圧の積分値を最小化することがなされる.この最小化には,大きな極大値を与える共振周波数を帯域外に追い出すことが有効と考えられるが,従来の位相最適化法ではその対応が困難なため,本稿で述べた台形則などによる積分値を最小にする検討に終始されている.本稿では,著者らのグループで開発された手法を用いた,顕著な固有周波数を帯域外に追い出す方式の有効性が見出された.

参考文献

[1] Sasaki, T., Yang, Y. and Hagiwara, I., Proposition of a New High Speed and High Efficiency Control Method for Plural Eigen Frequencies by Changing Topology, International Journal of Mechanical Engineering and Applications (IJMEA). (ISSN Print: 2330-023X; ISSN Online: 2330-0248).

折り紙や切り紙を用いた伸縮電子デバイス

岩瀬 英治 (早稲田大学) iwase@waseda.jp

近年、フレキシブルなセンサやディスプレイ、太陽電池などフレキシブル電子デバイスが盛んに行われている. このようなフレキシブル電子デバイスを実現するために、多くの研究では有機 EL や有機半導体のような有機材 料を用いている. 有機材料は、半導体材料や金属材料と比べた場合、機械的変形に対しては良い特性を持つかも しれないが、電気的特性は及ばない場合が多い.また、従来のフレキシブル電子デバイスの多くは曲げ変形は可 能であるが、伸縮変形はできないのが実情である.その本質的な理由として、曲げ変形には圧縮ひずみも引張ひ ずみもかからない中立面が存在するのに対し、伸縮変形ではひずみがゼロの領域が全く存在しないためである説 明できる.すなわち、発光部やセンサ部、配線部を薄く作り、基板の中立面に配置すれば曲げ変形可能なフレキ シブル電子デバイスは実現できる.一方で、伸縮変形には中立面が存在しないため曲げ変形可能なフレキシブル 電子デバイスな実現したアプローチでは解決できない.しかしながら、曲げ変形可能な電子デバイスは実現が容 易であることを逆手に取り、局所的には曲げ変形をすることで、デバイス全体としては伸縮させることができる のではないかと考えた.すなわち我々は、折り紙のような折り畳み変形を、"中立面を有した伸縮変形"と捉えた. これは、切り紙も同様の捉え方ができる.すなわち、折り紙構造や切り紙構造を用いることにより、良い電気的 特性をもつ "硬い"材料や素子を用いて、"伸縮可能な"電子デバイスを実現することができる.

具体的には、中立面に電気配線を配置し、曲げ変形を受けない平板部に発光素子やセンサ素子を配置すれば、 電気配線や発光素子・センサ素子に曲げ耐性・伸縮耐性がなかったとしても、デバイス全体としては伸縮耐性を 有することができる.図に示すように、金属や半導体など、曲げ耐性・伸縮耐性を有しないが良い電気的特性を もつ高性能な材料や素子を用いて、折り紙構造や切り紙構造を用いた伸縮変形可能な電子デバイス^{[1]-[4]}や熱電発 電デバイス^{[5]-[7]}の研究を行っている.



折り紙や切り紙を用いた伸縮電子デバイス

- [1] Y. Iwata, E. Iwase, Proc. of IEEE Int. Conf. on MEMS (MEMS2017), pp. 231-234, 2017.
- [2] A. Eda, H. Yasuga, T. Sato, Y. Sato, K. Suto, T. Tachi, E. Iwase, Micromachines, vol. 13, no. 6, 907, 2022.
- [3] H. Taniyama, E. Iwase, *Micromachines*, vol. 10, no.6, 395, 2019.
- [4] H. Taniyama, E. Iwase, *Micromachines*, vol. 12, issue 1, 76, 2021.
- [5] K. Fukuie, Y. Iwata, Eiji Iwase, *Micromachines*, vol. 9, issue 7, (2018), 315.
- [6] Y. Sato, S. Terashima, E. Iwase, Proc. of IEEE Int. Conf. on MEMS (MEMS2022), pp. 31-34, 2022.
- [7] S. Terashima, E. Iwase, Proc. of IEEE Int. Conf. on MEMS (MEMS2022), pp. 612-615, 2002.

柱状生物の脱皮としわの形成 -ヘビ、イモムシ、それから靴下-

九州大学 芸術工学研究院 米田大樹

E-mail : yoneda.taiju.508@m.kyushu-u.ac.jp

折り紙を広義に"うすい構造"と考えると、多くの生物の 体構造には折り紙的な要素をいくつも発見できる。その中で、 生物の表皮は普遍的なうすい構造であり、その表皮の 変形が肝要となる脱皮現象を取り上げた。

脱皮は節足動物を中心に多くの生物種で見られる成長の 方法で、硬い表皮を脱ぐことで内部の体を大きく更新する。 タイトルに挙げた、爬虫類であるヘビと昆虫のイモムシは、 系統的な分類はまったく異なる生物だ。それにも関わらず、 ともに柱状の長い体型で、どちらも表皮の弾性的な柔軟 さを利用して脱皮するという共通の機能を獲得している。 一般に脱皮の古い表皮は硬く、宇宙服を脱ぐような複雑な 行程で体を抜け出さなければ脱皮できない。それに対して、 柱状のヘビやイモムシは単純な体型ゆえに、より短時間で 脱皮を完了することができる利点を獲得している。しかし、 両者の脱ぐ皮の変形過程には決定的な違いがある。

ヘビは薄い皮の表と裏を反転させながら脱皮を進めるため、 最終的に抜け殻はひっくり返った状態となる。その状況は 乱暴に脱いだときの靴下を思い出せば想像しやすいかもし れない。一方イモムシの脱皮は、皮が座屈をともない折り たたまれるため、抜け殻はジャバラに折りたたまれた状態 となる。靴下でいうとルーズソックスがこれに該当する。 両者の違いは、皮の厚みや本体との隙間などの幾何的な 要因と、皮の曲げ剛性や摩擦などの力学的な要因によって 発現すると予想された。これらの脱皮モードの境界条件を 調べるために、体と皮の構造を円柱とそれを覆う弾性円 筒膜にモデル化して、力学実験(図1)と数値解析(図2)を 実施した。



(図1)体を剛体棒、表皮をシリコーン 円筒としてモデル化し、各脱皮の変形 過程での力学測定を実施した。



(図2)物理実験では測定が困難となる パラメータ領域での現象を詳しく調べる 用途で、有限要素解析ソフトを利用し、 実験と比較した。

昆虫の翅に関する生物模倣工学について

斉藤一哉(九州大学大学院芸術工学研究院) k-saito@design.kyushu-u.ac.jp

昆虫の翅にみられる巧妙な折り畳みは,非常 にコンパクトでありながら一瞬で収納・展開が 可能な究極の展開構造であり,様々な工学応用 が期待されている.中でもハサミムシの翅は, 展開状態の 1/15 程度と昆虫の中で最もコンパ クトに折り畳み可能であることに加え,広げた 状態の形を維持する特殊なスプリング機構な ど興味深い機能が多数報告されている. この 折り畳みはバッタやカマキリの翅や扇子と同 様に放射状のフレームに支えられているが,フ レームの中央部にヒンジ構造があり,閉じた扇 子を更に真ん中で折り畳むことでコンパクト な折り畳みを実現する.本講演では、著者らが 2020 年に発表したハサミムシの扇子の設計法 [1]をベースに実用化を進めている展開構造の プロトタイプに関して紹介する.現在,ハサミ ムシ扇子型展開構造における Thickness Accommodation に関する検討を行っており (図2)、これを基にした軽トラック屋台用の展 開屋根,および宇宙展開構造のプロトタイプに ついて報告する.

 K. Saito, et al.: Earwig fan designing: Biomimetic and evolutionary biology applications, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(2020), 17622-17626.



図3 展開型太陽電池パネルの開発



図1 ハサミムシの扇子の展開図設計法



図2 ハサミムシ型展開屋根(おさけむし:柴 田隆詠,中元翔一,斉藤一哉,株式会社鈴三材 木店、VUILDと共同開発.



自己組織化による曲線折紙 Self-organized Curved Folding

舘知宏, 堀川淳一郎 Tomohiro Tachi and Junichiro Horikawa

A sheet of paper has the property of not stretching or shrinking, but when a compressive force is applied, it can macroscopically shrink while forming a "wrinkle". Origami is a method of manipulating the relationship between intrinsic properties (properties of the surface measured along the surface) and extrinsic properties (properties of the surface in space) through such "macroscopic shrinkage." For example, the "Origamizer" is a technique that allows free-form surfaces containing bowl- or saddle-shaped regions to be made with a plane that has zero intrinsic Gaussian curvature.

Existing surface design approaches using origami tessellation have involved generating patterns on a given surface using predefined geometric rules and adjusting them numerically to satisfy the developability criteria. The limitation of the existing method is that the topology of the given pattern is arbitrary and has no relation to the surface to be generated. As a result, the efficiency of paper usage in design may become low, and properties such as structural stiffness and softness of the generated surfaces may be uncontrollable.

In this study, we aim to naturally generate crease patterns from the properties of the generated surfaces (or more precisely, from surface-to-surface mapping). We take an approach inspired by the self-organization of wrinkles in biological membranes that attempt to grow in confined spaces, such as brain wrinkles and insect shells. In such growing biological membranes, repeating patterns are generated in a self-organized manner as each part compresses against its surroundings. In this study, we generate a new origami tessellation by simulating the fold pattern of such a membrane. We also report that by extracting and organizing the wrinkle patterns produced, it becomes "Curved Origami," origami composed of curves and curved surfaces.



CMMA 共同研究集会 | 明治大学先端数理科学インスティテュート 現象数理学研究拠点 「折り紙の科学を基盤とするアート・数理および工学への応用Ⅲ」(2022)

折紙の折紙による折紙のための インタラクティブファブリケーション

Interactive fabrication of origami, by origami, for origami

鳴海 紘也東京大学 大学院工学系研究科Koya NarumiGraduate School of Engineering, The University of Tokyo

概要

本講演では、著者らが主に Human-Computer Interaction (HCI) の分野で実施してきた折紙にまつわるファブリ ケーション・アクチュエーション・インタラクション技術を紹介する。具体的には、(1)一般的なインクジェッ ト印刷機により数百から数千の面を持つ複雑な折紙テセレーションを自己折りする手法「Self-folded Tessellation」(=折紙のファブリケーション)、(2)3D モデルをあらかじめ折りたたんでから 3D プリントす ることで印刷時間・材料消費・収納スペースなどを低減する手法「Pop-up Print」および「Blow-up Print」(= 折紙によるファブリケーション)、(3)印刷のような方法で作製でき配線が不要な薄く軽くやわらかいアクチュ エータ「Liquid Pouch Motors」(=折紙のためのアクチュエーション)について述べる。また、我々が過去に行っ てきたその他の折紙インタラクション技術についても適宜触れる。

Abstract

In this talk, I will introduce three origami-related techniques on fabrication, actuation, and interaction which we conducted mainly in the field of human-computer interaction (HCI): (1) Self-folded Tessellation is the self-folding method based on a commercialized inkjet printer, which can automatically fold complex origami tessellation with hundreds or thousands of facets (i.e., fabrication of origami); (2) Pop-up Print and Blow-up Print are the 3D printing method of tall 3D objects requiring smaller printing time, smaller support material consumption, and smaller storage space, by printing a given model in the bistably folded state and unfolding it after fabrication (i.e., fabrication by origami); (3) Liquid Pouch Motors are the thin, lightweight, and soft pneumatic actuators that are printable and untethered as well (i.e., actuation for origami). If time allows, I will additionally introduce other origami-related interaction techniques we did in the past.

地図折りの表現および関連する圏構造

賈 伊陽 (成蹊大学情報科学科), 三谷 純(筑波大学システム情報系)

地図折り問題とそれに関連する諸問題の多くは、計算機科学における計算量の観点から研究さ れており、圏論および代数論の観点からの研究はあまり見かけない.本稿では、地図折りをブ ール行列で表現する方法論を導入することで、良い性質を持つ圏の構造が得られることについ て述べる.また、この圏の構造に基づいて Grothendieck 位相を構築できることを説明するとと もに、今後の可能性について考察する.

1. 状態行列

折り畳み状態が部分的であるか完全であるかにかかわらず,任意の折り畳み状態に対して,以 下のようにして唯一の状態行列を定義できる.

地図の任意の折り畳み状態Sにおいて、二つの正方形がなすペア(i, j)に対して、iとjの隣接 関係に基づいて対応する状態行列の(i, j)成分を定める.具体的には、Sが地図の一つの完全に 折り畳まれた状態であり、且つこの状態で正方形 i が正方形 j のすぐ下に位置する場合、また はSがある部分的に折り畳まれた状態で、正方形 i が正方形 j に隣接し、対応する任意の完全 に折り畳まれた状態で必ず正方形 j の下に位置する場合、状態行列の(i, j)成分に1を割り当て る.それ以外の場合は状態行列の(i, j)成分に0を割り当てる.

2. 状態遷移

本研究では、二種類の演算で状態遷移を表す.置換演算で同じレイヤーと異なる重なり順を持つ折り畳み状態の間の遷移を表現し、加法演算で新しい隣接関係を表現する.

3. 圏構造と Grothendieck 位相

状態行列を対象,存在し得る加法演算を射とすることで,地図折りの状態行列の圏を定義できる.以下に,この圏の重要な性質を幾つか列挙する.

- (1)この圏は始対象を持つが、終対象を持たない.
- (2)この圏は半順序の圏である.
- (3) この圏では、任意の二つの対象の積が存在する.

性質(3)に基づき,地図折りの状態行列の圏において,Grothendieck 位相を定義できる。即ち, 元の地図の折り畳み状態から直接に得られる幾何学以外にも,本研究は状態行列の空間におい て,さらに抽象的な,重なり順のみに関わる幾何学を定義することができた。今後の研究の方 向として,この構造のホモロジーについて考察することが考えられる。

折紙工法を活用した構造体の圧潰特性

明星大学 理工学部 機械工学系 寺田耕輔

2014年より毎年当研究集会において、筆者は折紙工法と呼ぶ工法を提唱し効果的な活用事例を提案してきている.こ こでは,種々条件での衝撃圧潰実験における衝撃エネルギー吸収測定結果に基づき,折紙工法を活用した構造体の圧潰 特性に関する下記事例について提案する.

- 折線加工によって圧潰しやすくした事例(図1~5参照) 1)
- による衝撃エネルギー吸収向上事例(図6~7参照) 2) IJ
- 3) 折紙工法によるPP製コア充填塩ビパイプでの衝撃エネルギー吸収向上事例(図8参照)







- 回転させながらカッタ
- 図1 飲料缶から円筒構造体切出手順





ロス折線30mm 合計8個,円筒曲面にクロス線加工し 軸方向2×周方向4 板厚低減はほとんどない 合計8個

タイプA(折線無) タイプB(市販折線缶) タイプC(折線クロス8個) 図2 薄肉アルミ製円筒構造体(長さ120mm)の3タイプ実験材料



図6角パイプ(□50×120mm,軟鋼板厚1.6mm)折線加工有無の圧潰現象

3D Printing with Kirigami Honeycombs

L. A. Diago, J. Shinoda and I.Hagiwara, Meiji University & Interlocus Inc., JAPAN

Introduction

Three-dimensional (3D) printing also formally known as Additive Manufacturing (AM) or rapid prototyping is the process of making three dimensional objects from 3D modeled data in progressive layers and it is currently being promoted as the spark of new industrial revolution. On the other hand, manufacturing technology based on honeycomb panels has had a rapid growth in recent years due to its lightness and strength. The manufacturing process has changed rapidly after Nojima and Sajito demonstrated that curved panels could be created using a kirigami operation. Nojima and Saito introduced the term "kirigami honeycomb" in [1] where they use the cross section of the 3D shape to describe the panel and include cuts in the pattern to obtain its 3D structure. Moreover, with conventional methods, STL (Stereo-lithography) data, which are often used by the additive 3D printer, can be used only after the formulas on the upper and lower surfaces are obtained. So, conventional methods cannot treat a structure with a non- uniform shape between the upper and lower surfaces, and also curvature and thickness can only change in one axis. Here we propose a new method such as the target structure is expressed in CAD and/or STL data and it is covered with a honeycomb core of any shape in any direction.

Materials and methods

The main problematic point to build complex 3d shapes resides in the presence of non-convex unit cells that overlap in the projection from 3D o 2D plane [1-3]. Instead of using Caslish and Gershenfeld [3] iterative approach to ensure that no sections of the folding pattern overlap, we propose a two-step algorithm to avoid overlap and minimize the amount of un-used materials in the final pattern.

Preliminary Results

Figure 1 shows the honeycomb representation of honeycombs apples. The top left part shows the created pattern and the top right part shows the folder state of the apple in the origamisimulator.org. The lower panels show the real models printed on a 3D printer Creator Pro 2.0. The lower left panel shows the original 3D apple printed with full material. The two middle panels showing the honeycomb apples printed with 30% and 70% reduction of the materials. Note that the weight is educed about 20% (154.3g vs 193.2g). The right panel shows the related model in paper.



Real models (PLA and Paper)

Figure 1. Honeycomb representation of honeycomb apples.

References

[1] Nojima, T., and Saito, K. Development of Newly Designed Ultra-Light Core Structures, JSME Int. A 2006, 49(1), pp. 38–42. doi:10.1299/jsmea.49.38

[2] RM Neville, et al., A kirigami shape memory polymer honeycomb concept for deployment.308Smart Mater. Struct.26, 05LT03 (2017)

[3] Calisch, SE, and Gershenfeld, NA. Towards Continu- ous Production of Shaped Honeycombs. Proceedings of the ASME 2018 13th International Manufactur- ing Science and Engineering Conference. Volume 3: Manufacturing Equipment and Systems. College Sta- tion, Texas, USA. June 18–22, 2018. V003T02A007. ASME. doi:10.1115/MSEC2018-6646

ハニカムコアを凌ぐキュービックコアの発明と展開

萩原一郎(明治大学)

新たなキュービックコア軽量化パネルを提案して、その力学特性や加工手法等について検討を行い、以下の結論が得られた.

- (1)提案したキュービックコアパネルでは、芯材と上下面板との結合の面積がハニカムコアに比し大きくなる ことから結合強度はより大になりハニカムコアでは適用が困難な長時間に亘り振動やせん断力を受ける 構造にも適用範囲が広がる可能性が得られた.更に、等重量でハニカム構造より 16%程度高い曲げ剛性を 持つことが理論的及び FEM 解析結果により確認できた.
- (2) コア芯材及び芯材と上下面パネルとの接合にも接着剤が使用されるが故にハニカムコアパネルは高温環境では使用が困難である.この環境下でもキュービックコアパネルが使用されるべく,簡単な穴抜きと曲げ成形によりキュービックコア芯材が加工でき,接着剤とリベットを使いキュービックコアパネルが容易に組み立てられ,比較的良い加工性能を持つことを確認した.ただし,リベットを使用する主な目的は面板と芯材の結合強度を増強することであり,将来,接着剤またはロウ付け等の結合方法により十分な結合強度が確保できれば,リベットを省略しても良く,加工工程の簡素化にも寄与できる.
- (3)湾曲部が存在する軽量化構造のニーズに合わせて、湾曲を有すキュービックコアを得るべく実際の湾曲構造の曲率半径と湾曲角度を実現するキュービックコアの切り取る範囲を求める設計式を導出した.それをもとに実際にキュービックコアの片側に対し、一部の材料を切り取る方法で容易にキュービックコアパネルの湾曲部が加工できることを示した.なお、本研究は埼玉工業大学の趙希禄教授との共同研究である。

[1] 萩原一郎、趙希禄、コアパネル、コアパネルの製造方法およびコア製造装置、出願番号: 特願 2022-177019 (2022 年 11 月 4 日).

単純折りモデルにおける一刀切り問題の最適解に関する研究

Ryuhei Uehara (uehara@jaist.ac.jp), School of Information Scinece, JAIST

Figure 3: 用いる記法

一刀切り問題とは、紙をうまく折りたたみ、ハサミで1回切るだけで、紙の上に描かれた図形の線分だけを切り抜くいう問題である。一刀切り問題に対して、一般の場合にいつでも可能であるという万能定理が知られている[2]. しかしこの万能定理では、かなり技巧的な折り操作が必要であり、必ずしも実用的でなく、機械化も難しい.そのため、単純折りと呼ばれる最も基本的な折りモデルを用いた場合の一刀切り問題が研究されている[1].[1]で示された結果では、単純折りの操作の回数が極めて多い場合があり、また一つの単純多角形しか扱うことができない.

単純折りモデル上での一刀切り問題において,複数の図形を扱い,かつ単純折り操作の回数を最小化する問題が [3] で研究されている. [3] では,複数の図形の最も単純なケースとして,細長い紙に様々な間隔で描かれた n 本の平 行線を一刀切りで切る問題(図1)が扱われている.この場合,平行線の間隔をうまく合わせて重ねて折ると,単純 折りの操作回数を減らすことができる. [3] では,単純折りの最短手順を O(n³) 時間で求めるアルゴリズムが示され ている.ただしここで n は平行線の本数である.

さて [3] と同様に細長い紙を折りたたみ、すべての折り線と交差する直線で一刀切りすると、すべてのカットラインが連結となり、図 2のようにジグザグの線分列を一度に切り抜くことができる. これは [1] における単純多角形の特殊なケースであり、[3] の技法を用いると単純折りの回数を最小化できる. つまり、[3] のアルゴリズムをうまく利用すれば、[1] の問題の特殊な例に対して、単純折りの操作の回数を最小化できることを暗示している.

本研究では、この直感を定式化する.入力は細長い紙 P に描かれたジグザグの線分列 (p_0, p_1, \ldots, p_n) である. P は必ずしも長方形でなくてもよく、側面は曲線であってもよいが、両端は直線とする. $p_0 \ge p_n$ は P の両端の直線の 上にあるとする. そしてジグザグの線分列 (だけ)を単純折り操作で一直線上に並べて、一刀切りで切り抜く問題を 考える.これは [1] の結果より、いつでも可能である.そこで [3] の技法を用いて単純折りの回数を最小化する.ここ で線分列の上の折れる可能性がある点に名前をつける.具体的には $p_i \ge p_{i+1}$ の中点を f_{i+1} とする.このとき紙 P を 単純折りで折れる可能性のある点は、 $f_1, p_1, f_2, p_2, \ldots, f_n$ と、区間 $[p_0, f_1] \ge [f_n, p_n]$ の中の任意の点となる.記述を 簡単にするために、点列 $(p_0, f_1, p_1, f_2, p_2, \ldots, f_n, p_n)$ を新たに $(x_0, x_1, x_2, \ldots, x_{2n-1}, x_{2n})$ と表現する.これらの点 x_i から P の外周部 ∂ P との間のユークリッド距離を考え、この距離の最大値を ℓ_{\max} とする.また点 $x_i \ge x_{i+1}$ の間 の距離を ℓ_{i+1} とする.さらに点 $x_i(0 < i < 2n)$ における線分の角度の大きくない方を $\theta_i(\leq 180^\circ)$ とする.このとき 次の定理が成立する.

Theorem 1 すべての i(0 < i < 2n) において、 $\ell_i \ge 2\ell_{\max}/\sqrt{3}$ かつ $\theta_i \ge 120^\circ$ のとき、単純折りモデル上の P の一 刀切り問題は、 $O(n^3)$ 時間で最短手順を求めることができる.

References

- E. D. Demaine, M. L. Demaine, A. Hawksley, H. Ito, P.-R. Loh, S. Manber, and O. Stephens. Making polygons by simple folds and one straight cut. In *China-Japan Joint Conference on Computational Geometry, Graphs and Applications* (CGGA 2010), pages 27–43. LNCS Vol. 7033, Springer-Verlag, 2011.
- [2] E. D. Demaine and J. O'Rourke. Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra. Cambridge University Press, 2007.
- [3] G. Hu, S.-i. Nakano, R. Uehara, and T. Uno. Simple Fold and Cut Problem for Line Segments. In Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG 2019), pages 158–163, 2019.

平行山谷付き平坦折り問題(その3)

伊藤大雄 根芝冴 電気通信大学 大学院 情報理工学研究科 itohiro@uec.ac.jp s.neshiba131@gmail.com

折り紙の平坦折り問題とは、紙片とその上に描かれた折り線が与えられ、全ての折り線を 180 度に折って、折りあ がりを平坦にすることができるか否かを問う問題であり、各折り線に山折り (M) か谷折り (V) かが与えられている問 題と、与えられず自由に折れる問題の二通りあるが、どちらも一般には NP 完全である [3]。しかし多項式時間解法が 知られている部分問題も存在する。例えば、紙片を長方形とし、折り線を短辺に平行なもののみに限定し、折り線に山 谷を与えた問題¹、1 次元山谷付き平坦折り問題 (One-dimensional flat foldability with mountain-valley assignment; 1DFF-MV) に対する線形時間アルゴリズムが Arkin ら [1] によって与えられている。その問題の拡張として、紙片を 平行四辺形に拡張し、折り線をやはり短辺に平行なもののみに限定した問題、平行斜め山谷付き帯平坦折り問題 (Strip flat folding problem with parallel creases and mountain-valley assignment; StripFFP-MV) (図 1 (a) 参照) に対し、 2020 年に著者らのグループによって [2]、さらに最近、その結果を紙片が凸多角形のものにまで拡張し、線形時間ア ルゴリズムを示した [4]。その後、その結果をさらに拡張し、凸多角形を含む軸凸 (axis convex) 多角形に対する線 形時間アルゴリズムの存在を昨年のこの研究集会で述べた。なお、平行山谷付き平坦折り問題の問題例が軸凸である とは、折り線に平行または垂直な任意の直線について、その図形との共有部分が連続(線分)であること(図 1 (b) 参照)であり、折り線が平行という条件の下では凸多角形を含むより広い概念である。今回はその後の進展を述べる とともに、折り線が平行という制約の下で NP 完全となる問題についての考察も行う。

図 1: 平行山谷付き平坦折り問題: (a) 紙片が平行四辺形の例と (b) 軸凸多角形

参考文献

- Esther M. Arkin, Michael A. Bender, Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Joseph S.B. Mitchell, Saurabh Sethia, and Steven S. Skiena: When can you fold a map?, Computational Geometry: Theory and Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 23–46, 2004.
- [2] Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Hiro Ito, Chie Nara, Izumi Shirahama, Tomohiro Tachi, and Mizuho Tomura: Flat folding a strip with parallel or nonacute zig-zag creases with mountain-valley assignment, Special Issue on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games, Journal of Information Processing, Vol. 28, No. 12, pp. 825–833, 2020.
- [3] Erik D. Demaine and Joseph O'Rourke: Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra, Cambridge University Press, 2007.
- [4] Hiro Ito and Sae Neshiba: Flat folding problem with parallel creases with mountain-valley assignment on a convex polygonal piece of paper, The 23rd Thailand-Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games (TJCDCG³ 2020+1), Chiang Mai, Thailand, Sept. 3–5, 2021.

¹山谷を与えられていない場合はジグザグに折る(すなわち、山谷を交互に与える)ことで自明に平坦折り可能。

四節球面機構と単頂点剛体折紙の対応のデザイン応用

Design application of the correspondence between spherical 4R linkage and rigid single vertex origami

愛知工業大学 工学部 Aichi Institute of Technology 建築学科 宮本 好信 Yoshinobu Miyamoto

球面機構と剛体折紙の対応を利用したデザイン応用を検討する。平面四節回転機構はグラ スホフ条件により入出力棒の動作で分類され^{[1][2]}、これを球面機構に拡張した場合の動作 は33種に分類される^[1]。この球面四節回転機構を単頂点四折り線の折り紙に対応させて、 平面頂点と非平面頂点の折りたたみ動作を示す。球面機構と折り紙の動作の対応を整理し て、機構と折り紙の双方からの設計方法を提案する。球面機構を切り紙折り紙(RES)に応 用した事例を紹介する。

We discuss design applications using the correspondence between the 4R spherical l inkage and the rigid origami. The planar four-bar linkage is classified by input/output t bar motions according to the Grashof criterion^{[1][2]}, and when this is extended to a sp herical mechanism, the motions are classified into 33 types^[1]. Corresponding the sph erical 4R linkage to the single-vertex degree-four rigid origami, we show the folding behavior of the planar and non-planar vertices. By organizing the correspondence b etween the spherical linkage and the origami behavior, we propose a design method from both the mechanism and the origami. We present a study of the application of the 4R spherical linkage with non-rigid kirigami-origami(RES).

Fig. 1. The spherical 4R linkage. [1] Fig. 2. Kirigami spherical 4R linkage. Fig. 3. RES applicable with spherical 4R linkage.

- [1] J.Jesús Cervantes-Sánchez, Hugo I Medellı´n-Castillo, A robust classification scheme for spherical 4R linkag es, Mechanism and Machine Theory, Volume 37, Issue 10, 2002, Pages 1145-1163, ISSN 0094-114X.
- [2] J.M. McCarthy, Geometric Design of Linkages, Springer, Berlin, 2000.

剛辺数に着目した多面体の連続的平坦化問題(Ⅱ)

松原和樹(埼玉大学教育学部) 奈良知惠(明治大学先端数理科学インスティテュート)

折り目によって折ることができる紙のような素材でできた多面体を平坦に折り畳む問題(詳細は[1]を参 照)を考える。ただし、ここでは紙の厚さは考えず、切込みや伸縮は許されないものとする。「多面体が各 面の形状を変えずに連続的に変形したとしても、その体積は不変である」というフイゴ定理[2]より、多面体 の連続的平坦化においてすべての面の剛性を保つことは不可能であることが示される。つまり、平坦化状 態への連続的な変形においては、いずれかの面を連続的に動く折り目(移動折り目)によって変形させる 必要がある。これまで様々な連続的平坦化手法が考案され、特に我々は移動折り目領域の大きさ、剛性 を保つ面の数、剛性を保つ辺の数などに着目した連続的平坦化問題の研究を進めてきた。

本講演では、与えられた多面体のどの辺も折らない連続的平坦化問題、つまり、初期状態から平坦化 状態へどの辺も折らずに連続的に変形できるかという問題について、得られた結果を報告する。

- 定理 (1) 任意の凸多角錐はどの辺も折らない連続的平坦化が不可能である。
 - (2) どの辺も折らない連続的平坦化が可能な非凸2n角錐 $(n \ge 2)$ が存在する。
 - (3) どの辺も折らない連続的平坦化が可能な非凸2n角柱 $(n \ge 2)$ が存在する。

例 どの辺も折らない非凸12角柱の連続的平坦化(上:側面,下:上面と底面) 本講演の内容は[3]に基づいている。

参考文献

- Demaine, E.D., O'Rourke, J.: Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra, Cambridge University Press, 2007.
- [2] Connelly, R., Sabitov, I., Walz, A.: The bellows conjecture, Beiträge Algebra Geom. 38, 1-10, 1997.
- [3] Matsubara, K., Nara, C.: Continuous flattening of polyhedra with every edge rigid, in preparation for Proceedings of the 24th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games (JCDCG³ 2022).

超立方体の折り畳みとひし形の翼折り

奈良知恵 (明治大学先端数理科学インスティテュート, cnara@jeans.ocn.ne.jp)

2次元の平面上にある正方形について、もう1つ次元を上げて平面に直交する新しい軸方向に平行移 動すると立方体が得られる。同様に、3次元空間の立方体について、もう1つ次元を上げて3次元空間に 直交する新しい軸方向に平行移動すると4次元の超立方体が得られる。立方体の表面は6個の正方形で 構成され、これらは1つの正方形面上に連続的に折りたたむ方法は複数あるが図1は一つの例である。 この折りたたみでは上面と底面には折り目が入らず、4個の側面は高さ半分のところで内側に半分に折 りたたまれるが、当然、隣り合う面同士がぶつかるので、どちらか一方を折り曲げて他方に貼り合わせて いる。このときの動きは「ひし形の翼折り」の応用としてとらえることができる。

さて、4次元の超立方体には24個の正方形の面があり、それらは2次元スケルトンを構成する(図2)。 ひし形の翼折りを使うと、これを1つの正方形の面上に連続的に折りたたむことができる[1]。このと き、図3のように分解して図1のアイデアを用いる。では、超立方体の表面(8個の立方体からなる3 次元スケルトン)を1つのファセット(立方体)上に折りたたむことはできるのだろうか。本講演では、 最近の研究結果[2](伊藤仁一氏との共同研究)について紹介する。

図 2.4 次元超立方体

図3. 正方形面の分解

参考文献

[1] J. Itoh, C. Nara, "Continuous flattening of the 2-Skeletons in a hypercube. Graphs and Combinatorics, 36, 331-338 (2020). DOI: 10.1007/s00373-019-02100-8

[2] C. Nara, J. Itoh, "Continuous flattening of the surface of a hypercube onto its facet". Abstract for JCDCGGG 2022, Sept. 9-11, Zoom.