

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：13302

研究種目：挑戦的研究(開拓)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06287・20K20311

研究課題名(和文)細胞の形状形成への計算折り紙の応用

研究課題名(英文)Application of computational origami to formulation of cells

研究代表者

上原 隆平(Uehara, Ryuhei)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：00256471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究テーマでは、微小サイズの細胞の立体構造の構築について、実際の細胞折り紙による実験を通じて理論モデルを構築し、細胞にとっての折りやすさを評価することが目的であった。そしていくつかの条件において細胞での折りの実験を行った。こうした実験結果を踏まえ、物理的な制約を考慮した妥当な「折りやすさの指標」を与えるモデルの候補をいくつか考案した。実験データと考案した理論モデルの間の妥当性については現在検証を進めており、今後論文として公表する準備を進めている。特に数理的な側面から、物理的な制約を取り入れた理論モデルをある程度構築できたことが本研究の最大の意義であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

例えば幹細胞では細胞の形状から機能分化が起こることが知られている。仮に幹細胞の形状を制御できれば狙った臓器を組織させることが可能となり、再生医療に大きなインパクトを与えられる。細胞折り紙は、目的とする形状の細胞の塊を直接構成することに比べて大きな優位性があると考えられるが、細胞にとって折りやすい展開図を与えることが求められる。結果的に理論的なモデルの構築と実験によるある程度の評価ができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to construct a theoretical model for the construction of the three-dimensional structure of small-sized cells through experiments using actual cell origami, and to evaluate the foldability for cells. Under some conditions, cell folding experiments were performed. Based on these experimental results, we devised some model candidates that give a valid "foldability index" considering physical constraints. We are currently verifying the validity between the experimental data and the theoretical model we devised, and are preparing to publish it as a paper in the future. Especially from the mathematical aspect, it is considered that the greatest significance of this research is that we were able to construct a theoretical model that incorporates physical constraints to some extent.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：バイオ折り紙 細胞折り紙 計算折り紙 展開図 多面体 高速列挙アルゴリズム 空間充填立体

1. 研究開始当初の背景

本研究は「細胞折り紙」という新しい研究分野の推進を目的とした。細胞折り紙とは、本研究プロジェクトメンバーの繁富が考案・開発した手法で、薄いマイクロサイズのプレートを設置し、その上に細胞をばらまき、育成することで、細胞の引きよせる力によってプレートを立体化させるという技術である(図1)。

生体内にはさまざまな立体構造の組織、臓器があり、その機能において、形状は重要な役割を果たしている。例えば幹細胞では、細胞の形状から機能分化や機能の決定が起こることが知られている。したがって、仮に幹細胞の形状を人間が自在に制御できれば、細胞の分化を制御して狙った臓器を組織させることが可能となり、再生医療に大きなインパクトを与えられると考えられる。しかし現在の技術では、細胞を特定の3次元立体形状になるように制御することは非常に困難である。そこで平坦な面の上に適切にプレートを配置し、それを細胞に折らせることで、細胞が自発的に立体化することを目指すのが細胞折り紙である。

細胞折り紙は、目的とする形状の細胞の塊を直接構成することに比べて単純であり、コスト面でも大きな優位性があると考えられるが、平坦に配置したプレートから立体を構成することから、細胞の特性に合わせて、細胞にとって折りやすい展開図を与えることが求められる。また、細胞が引き寄せられる力を制御することは難しく、作られる立体の大きさには制限があるため、まず個々の細胞に小さな立体を構成させ、次にその小立体をブロックのように組み合わせることで大きな立体を作る必要があると考えられる。

細胞の牽引力でプレートが引張られ立体が折り畳まれる

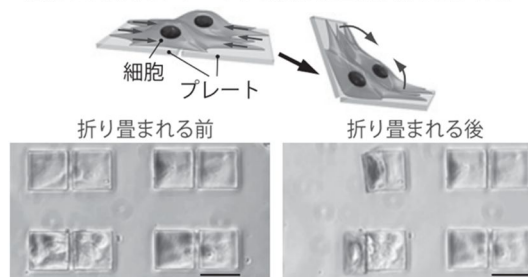


図1. 細胞折り紙技術の概略図とマイクロプレートが細胞の牽引力により折り畳まれる様子. スケールバー: 50 μm .

2. 研究の目的

本研究の目的は、こちらで意図した形状のマイクロサイズの立体を、細胞を用いて効率よく折るための技法を確立することであった。細胞の特性をモデル化し、最適な展開図を選び出すアルゴリズムを開発し、実際の細胞で狙った立体を効率よく折らせることを目指した。本研究では、立体と展開図に関する計算折り紙の技法を駆使して、細胞の立体形成に特化したモデル化と解析を行い、「細胞にとって折りやすい」展開図の研究を行う。

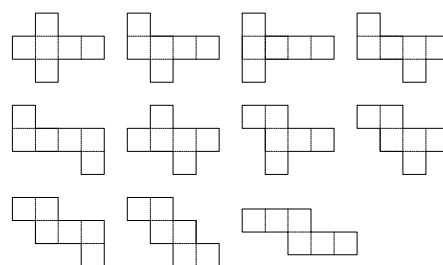


図2. 立方体の11種類の展開図

そのためには、立体をうまく展開して展開図を作り、そこから折り紙の要領で目指す立体を形成するように細胞をうまく誘導・制御する必要がある。そこで本研究では「細胞にとって折りやすい展開図」の定式化と評価を行う。例えば立方体には11種類の展開図が存在することが知られている(図2)が、その中のどの展開図が細胞にとって折りやすいかという問題は未解決であった。直感的には近い面同士は簡単に折れるが、遠くの面を引き寄せするには、より多くの力が必要となる。しかしこうした距離の定義には複数の候補がある。また特に細胞が斜めに置かれた面同士を引き寄せることがあり、その場合は単純な距離だけを用いた評価ではうまくいかないことが予想された。こうした細かい部分の構造と全体の構造を考慮して定量的に細胞にとっての折りやすさを評価する方法は、これまで知られていなかった。そのためモデルの構築と実験とを繰り返して評価方法を確立すると同時に、細胞による立体構成の技法を確立することが本研究の目的であった。

3. 研究の方法

そもそも本研究テーマは分野横断的側面が強く、その遂行にあたっては理論と実験との双方の結果を密にフィードバックしつつ並行して研究を進めることが重要であった。特に次の三分担を密に融合して研究を進めた。

(1) 理論的モデルの整備: 展開図の理論モデルを構築し、細胞にとっての折りやすさをモデル化し、これを計算するアルゴリズムを開発した。具体的には立体の面を構成する各面間の距離に基づいて、細胞にとっての折りやすさを定式化した。

また実際の展開図を多数生成して平面上に配置するときには、ある程度展開図の間が狭い方が

細胞を均一にばらまいて多数の立体を一度に作る事が容易になる。しかしその一方、狭すぎると複数の展開図が細胞によって引き寄せられて合体し、意図しない立体ができて、成功率が低下する。したがって展開図同士が干渉しないように距離を取りながら、かつなるべく狭い領域にたくさん詰め込む平面充填も問題となる。こうした副次的な問題も解く必要がある。

(2) アルゴリズムの実装：開発したアルゴリズムを実装し、膨大な展開図の中から「細胞が折りやすい展開図」を実用的な時間で見つけ出すことを目指した。また平面充填に関する問題も独立した問題としてアルゴリズムを考案した。

(3) 実験による確認：実際に細胞に折り紙を折らせて、実験結果と理論モデルの整合性を調査する。この実験の中では、プレートの剥がしやすさを一様にする、あるいは特定の面だけ外れにくいようにして、そこを中心にして細胞で折らせるなど、いくつかの選択肢が考えられる。

上記の三つの領域は、互いにフィードバックをしつつ、密に連絡を取りながら、相補的に進めていく必要がある。簡単な予備実験を行い、細胞に単純な立体を折らせてデータを取得することから始めて、取得したデータに基づいて素朴な理論モデルを精緻化する一方、より複雑な立体を折らせることで、より精度の高いモデルの構築を目指した。

4. 研究成果

当初の予定通り、立方体の展開図に基づいた理論的なモデルの検討と構築、実験によりある程度の評価ができた。理論的なモデルについては、1次式で表現できる静的なバランスと、2次式で表現できる動的なバランスをそれぞれ評価できることが明確となり、細胞にとっての折りやすさが、「力」という1次の項と「エネルギー」という2次の項を総合することで表現できることが明確になった。細胞の回り込みにより、例えば斜めに離れた面を引き寄せることがあるが、ここは距離関数の定義の工夫によって、ある程度評価関数に盛り込むことが可能である。

また実験に際しては、多くの展開図の中から適切なものを選び、そのコピーを大量に描画する必要がある。多くの展開図の中から適切な展開図を選択するには、まずはすべての種類の展開図を同じ個数だけバランス良く配置して比較実験する必要がある。具体的には、

- (1) すべての展開図を
- (2) 同じ個数ずつ大量に
- (3) 偏りのないように
- (4) 干渉しないよう、ある程度距離を離して
- (5) なるべく狭い範囲に多くの展開図を配置する

という5つの条件を満たすように平面上にバランス良く展開図のコピーを配置する必要がある。これは一種の敷き詰めパズルであり、一般には効率よく解くことが困難な問題であることがわかっている。しかしパズルを効率よく解く最近の技法を活用することで、高速に解くことが可能となった。これは細胞折り紙の実験の準備としては最も手がかかると予想された部分であり、この部分が現実的な時間で解決できるようになったことは、今後の実験においても有用な研究成果である。

ところで小さな立体を多数組み合わせる大きな立体を作る場合、間に隙間ができては応用面で問題がある。こうした隙間が生じないという性質をもつ立体は空間充填立体と呼ばれる特別な立体である。例えば立方体や直方体は身近な空間充填立体であり、ブロック玩具などにもよく見られる。この立体を効率よく大量に折らせることができれば、3次元空間上でブロックのように組み立てることも可能となるかもしれない。しかし細胞折り紙でブロックを作って組み立てを行う場合には、立方体や直方体では大きな問題がある。具体的にはズレが簡単に生じると考えられる。大きな立体を組んだときにズレが生じないような空間充填立体は切頂八面体と菱形十二面体しかないことが知られている(図3)。

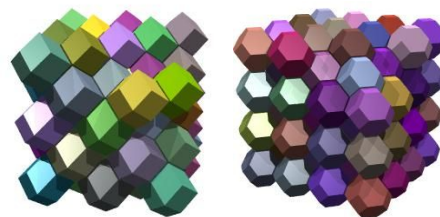


図 3. 切頂八面体と菱形十二面体による空間充填の様子 (Wikipedia より)

こうした好ましい性質を持つ2種類の多面体である切頂八面体と菱形十二面体は、組合せ爆発と呼ばれる理由により、天文学的とも言える膨大な数の展開図を持つ。また細胞折り紙においては、単に閉じた立体を作ることに別の問題も考えられる。具体的には、単位となる空間充填立体を多数集めて大きな立体を構成するには、そのための移動技術も必要となり、また組み立てたあとで立体の内部からプレートを除去する必要があると予想される。こうした問題に対する解法として、穴のあいた立体を構成することを考える。つまり面の一部を除いた立体を構成すれば、空間を充填すると同時に互いに結合させることを狙うことができる。

また、面の一部をうまく除くことにより、展開図の個数を劇的に減らすことも可能となる。例えば切頂八面体は8つの正六角形の面と6つの正方形の面を持つが、ここから6つの正方形を取り除けば、残った「穴の開いた切頂八面体」は通常正八面体と同じ構造をもち、展開図の数が11種類に激減する。この11種類の展開図に、立方体でのモデルを適用することで、細胞にとって折りやすい展開図を絞り込むことができた。

上記の理由により、今後は「穴開き切頂八面体」を基本立体として中心に据え、立方体の研究

成果を適用し、基本立体を効率良く安定的に大量に細胞に折らせる技法を確立する必要があることが明確になった。またその先には、構成した「穴開き切頂八面体」同士を組み立てて、より大きな立体を構成する技術、さらにはこちらが意図する立体の形をデザインし、その形に合わせて基本立体を組み立てる技術へとより発展的な研究が求められる。

今後の実験とそれに基づく評価、さらには大量に構成した「穴開き切頂八面体」による大きな立体の構成については、研究プロジェクト「計算折紙と細胞折紙技術による細胞の立体構造の最適化」(基盤研究(B)・豊富香織代表)にて継続して研究をする予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 11件／うちオープンアクセス 18件）

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名 Jia Yiyang, Mitani Jun, Uehara Ryuhei | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Efficient Algorithm for $2 \times n$ Map Folding with a Box-pleated Crease Pattern | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Information Processing | 6. 最初と最後の頁 806 ~ 815 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.28.806 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ouchi Koji, Uehara Ryuhei | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Minimum Forcing Sets for Single-vertex Crease Pattern | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Information Processing | 6. 最初と最後の頁 800 ~ 805 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.28.800 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 MIYANO Eiji, SAITOH Toshiki, UEHARA Ryuhei, YAGITA Tsuyoshi, ZANDEN Tom C. van der | 4. 巻 E103.A |
| 2. 論文標題 Complexity of the Maximum k -Path Vertex Cover Problem | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 1193 ~ 1201 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019DMP0014 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Ito Takehiro, Kaminski Marcin, Ono Hiroataka, Suzuki Akira, Uehara Ryuhei, Yamanaka Katsuhisa | 4. 巻 283 |
| 2. 論文標題 Parameterized complexity of independent set reconfiguration problems | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Discrete Applied Mathematics | 6. 最初と最後の頁 336 ~ 345 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dam.2020.01.022 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| 1. 著者名 Mizunashi Koichi、Horiyama Takashi、Uehara Ryuhei | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Efficient Algorithm for Box Folding | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Graph Algorithms and Applications | 6. 最初と最後の頁 89 ~ 103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7155/jgaa.00520 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Yamazaki Kazuaki、Saitoh Toshiki、Kiyomi Masashi、Uehara Ryuhei | 4. 巻 806 |
| 2. 論文標題 Enumeration of nonisomorphic interval graphs and nonisomorphic permutation graphs | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Theoretical Computer Science | 6. 最初と最後の頁 310 ~ 322 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2019.04.017 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1. 著者名 Erik D. Demaine、Matias Korman、Jason S. Ku、Joseph S. B. Mitchell、Yota Otachi、Andre van Renssene、Marcel Roeloffzen、Ryuhei Uehara、Yushi Uno | 4. 巻 90 |
| 2. 論文標題 Symmetric Assembly Puzzles are Hard, Beyond a Few Pieces | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Computational Geometry : Theory and Applications | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.comgeo.2020.101648 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名 SHIRAYAMA Takumu、SHIGEMURA Takuto、OTACHI Yota、MIYAZAKI Shuichi、UEHARA Ryuhei | 4. 巻 E102.A |
| 2. 論文標題 On Computational Complexity of Pipe Puzzles | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 1134 ~ 1141 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.1134 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1. 著者名 Yamanaka Katsuhisa, Demaine Erik D., Horiyama Takashi, Kawamura Akitoshi, Nakano Shin-ichi, Okamoto Yoshio, Saitoh Toshiki, Suzuki Akira, Uehara Ryuhei, Uno Takeaki | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Sequentially Swapping Colored Tokens on Graphs | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Graph Algorithms and Applications | 6. 最初と最後の頁 3~27 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7155/jgaa.00482 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1. 著者名 Katsuhisa Yamanaka, Erik D. Demaine, Takashi Horiyama, Akitoshi Kawamura, Shin-Ichi Nakano, Yoshio Okamoto, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Sequentially Swapping Colored Tokens on Graphs | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Graph Algorithms and Applications | 6. 最初と最後の頁 3-27 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7155/jgaa.00482 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. 著者名 Katsuhisa Yamanaka, Shogo Kawaragi, Takashi Hirayama | 4. 巻 102-D(3) |
| 2. 論文標題 Exact Exponential Algorithm for Distance-3 Independent Set Problem | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions | 6. 最初と最後の頁 499-501 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018FCL0002 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. 著者名 Koji Ouchi, Ryuhei Uehara | 4. 巻 102-D(3) |
| 2. 論文標題 Efficient Enumeration of Flat-Foldable Single Vertex Crease Patterns | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions | 6. 最初と最後の頁 416-422 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018FCP0004 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名 NAKAHATA Yu, KAWAHARA Jun, HORIYAMA Takashi, KASAHARA Shoji | 4. 巻 E101.A |
| 2. 論文標題 Enumerating All Spanning Shortest Path Forests with Distance and Capacity Constraints | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 1363 ~ 1374 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E101.A.1363 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1. 著者名 Yamanaka Katsuhisa, Horiyama Takashi, Keil J. Mark, Kirkpatrick David, Otachi Yota, Saitoh Toshiki, Uehara Ryuhei, Uno Yushi | 4. 巻 729 |
| 2. 論文標題 Swapping colored tokens on graphs | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Theoretical Computer Science | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2018.03.016 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. 著者名 Abel Zachary R., Demaine Erik D., Demaine Martin L., Ito Hiro, Snoeyink Jack, Uehara Ryuhei | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 Bumpy pyramid folding | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Computational Geometry | 6. 最初と最後の頁 22 ~ 31 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.comgeo.2018.06.007 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名 Zachary Abel, Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, David Eppstein, Anna Lubiw, Ryuhei Uehara | 4. 巻 9(1) |
| 2. 論文標題 Flat foldings of plane graphs with prescribed angles and edge lengths | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Computational Geometry | 6. 最初と最後の頁 74-93 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20382/jocg.v9i1a3 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Md Belayet Ali, Takashi Hirayama, Katsuhisa Yamanaka, Yasuaki Nishitani | 4. 巻 101-A(12) |
| 2. 論文標題 Function Design for Minimum Multiple-Control Toffoli Circuits of Reversible Adder/Subtractor Blocks and Arithmetic Logic Units | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions | 6. 最初と最後の頁 2231-2243 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E101.A.2231 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名 XU Dawei, HUANG Jinfeng, NAKANE Yuta, YOKOYAMA Tomoo, HORIYAMA Takashi, UEHARA Ryuhei | 4. 巻 E101.A |
| 2. 論文標題 Rep-Cubes: Dissection of a Cube into Nets | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 1420 ~ 1430 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E101.A.1420 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Abel Zachary, Ballinger Brad, Demaine Erik D., Demaine Martin L., Erickson Jeff, Hesterberg Adam, Ito Hiro, Kostitsyna Irina, Lynch Jayson, Uehara Ryuhei | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 Unfolding and Dissection of Multiple Cubes, Tetrahedra, and Doubly Covered Squares | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Information Processing | 6. 最初と最後の頁 610 ~ 615 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjnip.25.610 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Horiyama Takashi, Iizuka Takashi, Kiyomi Masashi, Okamoto Yoshio, Uehara Ryuhei, Uno Takeaki, Uno Yushi, Yamauchi Yukiko | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 Sankaku-tori: An Old Western-Japanese Game Played on a Point Set | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Information Processing | 6. 最初と最後の頁 708 ~ 715 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjnip.25.708 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Horiyama Takashi、Ito Takehiro、Nakatsuka Keita、Suzuki Akira、Uehara Ryuhei | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 Complexity of Tiling a Polygon with Trominoes or Bars | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Discrete & Computational Geometry | 6. 最初と最後の頁 686 ~ 704 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00454-017-9884-9 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 1. 著者名 Xu Dawei、Horiyama Takashi、Shirakawa Toshihiro、Uehara Ryuhei | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Common developments of three incongruent boxes of area 30 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Computational Geometry | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.comgeo.2017.03.001 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 31件)

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Ko Minamisawa, Ryuhei Uehara, Masao Hara |
| 2. 発表標題 Mathematical Characterizations and Computational Complexity of Anti-Slide Puzzles |
| 3. 学会等名 The 15th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Giovanni Viglietta, Ryuhei Uehara, Kwon Kham Sai |
| 2. 発表標題 Cyclic Shift Problems on Graphs |
| 3. 学会等名 The 15th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Kazuaki Yamazaki ,Mengze Qian,Ryuhei Uehara |
| 2 . 発表標題 Efficient Enumeration of Non-isomorphic Distance-Hereditary Graphs and Ptolemaic Graphs |
| 3 . 学会等名 The 15th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Giuseppe A. Di Luna,Ryuhei Uehara,Giovanni Viglietta,Yukiko Yamauchi |
| 2 . 発表標題 Gathering on a Circle with Limited Visibility by Anonymous Oblivious Robots |
| 3 . 学会等名 The 34th International Symposium on Distributed Computing (国際学会) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Tonan Kamata,Akira Kadoguchi ,Takashi Horiyama,Ryuhei Uehara |
| 2 . 発表標題 Efficient Folding Algorithms for Regular Polyhedra |
| 3 . 学会等名 CCCG 2020 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Dat Hoang Tran, Ryuhei Uehara |
| 2 . 発表標題 Efficient Enumeration of Non-isomorphic Ptolemaic Graphs |
| 3 . 学会等名 The 14th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (国際学会) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yasuaki Kobayashi, Koki Suetsugu, Hideki Tsuiki, Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 On the Complexity of Lattice Puzzles |
| 3. 学会等名 The 30th International Symposium on Algorithms and Computation (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Rep-cube and related results |
| 3. 学会等名 Symmetry: Art and Science - 11th Congress and Exhibition (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Introduction to Computational Origami |
| 3. 学会等名 The 11th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Yiyang Jia, Jun Mitani, Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Efficient Algorithm for $2 \times n$ Map Folding with Diagonal Creases |
| 3. 学会等名 JCDCGGG 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Takashi Horiyama, Kazuhiro Kurita, Yoshio Okamoto, Kei Uchizawa, Ryuhei Uehara |
| 2 . 発表標題 Mind The Mind with Synchronous Clocks |
| 3 . 学会等名 JCDCGGG 2019 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Hugo A. Akitaya, Erik D. Demaine, David Eppstein, Tomohiro Tachi, Ryuhei Uehara |
| 2 . 発表標題 Minimal Ununfoldable Polyhedron |
| 3 . 学会等名 JCDCGGG 2019 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Fabian Klute, Irene Parada, Takashi Horiyama, Matias Korman, Ryuhei Uehara, Katsuhisa Yamanaka |
| 2 . 発表標題 Efficient Segment Folding is Hard |
| 3 . 学会等名 Canadian Conference on Computational Geometry (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Koji Ouchi, Ryuhei Uehara |
| 2 . 発表標題 Minimum Forcing Sets for Single-Vertex Crease Pattern |
| 3 . 学会等名 Canadian Conference on Computational Geometry (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Martin L. Demaine, Robert Hearn, Jason S. Ku, Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Rectangular Unfoldings of Polycubes |
| 3. 学会等名 Canadian Conference on Computational Geometry (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Guoxin Hu, Shin-Ichi Nakano, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno |
| 2. 発表標題 Simple Fold and Cut Problem for Line Segments |
| 3. 学会等名 Canadian Conference on Computational Geometry (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Erik D. Demaine, David Eppstein, Adam Hesterberg, Kshitij Jain, Anna Lubiw, Ryuhei Uehara, Yushi Uno |
| 2. 発表標題 Reconfiguring Undirected Paths |
| 3. 学会等名 WADS 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Takashi Horiyama, Shin-ichi Nakano, Toshiki Saitoh, Koki Suetsugu繹、Kira Suzuki, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno, Kunihiro Wasa |
| 2. 発表標題 Max-Min 3-dispersion Problems |
| 3. 学会等名 COCOON 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Tomoko Taniguchi, Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Impossible Folding Font |
| 3. 学会等名 Bridges 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Duc A. Hoang, Amanj Khorramian, Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Shortest Reconfiguration Sequence for Sliding Tokens on Spiders |
| 3. 学会等名 The 11th International Conference on Algorithms and Complexity (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Koichi Mizunashi, Takashi Horiyama, Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Efficient Algorithm for Box Folding |
| 3. 学会等名 WALCOM 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Takashi Horiyama, Masahiro Miyasaka, Riku Sasaki |
| 2. 発表標題 Isomorphism Elimination by Zero-Suppressed Binary Decision Diagrams |
| 3. 学会等名 CCCG 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Katsuhisa Yamanaka, Takashi Horiyama, Takeaki Uno, Kunihiro Wasa |
| 2. 発表標題 Ladder-Lottery Realization |
| 3. 学会等名 CCCG 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Tianfeng Feng, Takashi Horiyama, Yoshio Okamoto, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Takeaki Uno, Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Computational Complexity of Robot Arm Simulation Problems |
| 3. 学会等名 IWOCA 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Toshihiro Akagi, Tetsuya Araki, Takashi Horiyama, Shin-Ichi Nakano, Yoshio Okamoto, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno, Kunihiro Wasa |
| 2. 発表標題 Exact Algorithms for the Max-Min Dispersion Problem |
| 3. 学会等名 FAW 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Kaori Kuribayashi-Shigetomi |
| 2. 発表標題 Origami in Micro-Nano Technology -- Applications to Regeneration Medicine using Cell Origami -- |
| 3. 学会等名 19th RIES-Hokudai International Symposium (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Qian He, Takaharu Okajima, and Kaori Kuribayashi-Shigetomi |
| 2 . 発表標題 Producing Various Shapes of 3D Cell Co-culture Microstructures using a Single Cell Origami Technique |
| 3 . 学会等名 Origami in Science, Mathematics, and Education (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 K. Oshima, R. Uehara, and J. Mitani |
| 2 . 発表標題 Optimal Solution Search for Origami Checkerboard Puzzles |
| 3 . 学会等名 Origami in Science, Mathematics, and Education (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Kazuaki Yamazaki, Toshiki Saitoh, Masashi Kiyomi and Ryuhei Uehara |
| 2 . 発表標題 Enumeration of Nonisomorphic Graphs in Graph Classes |
| 3 . 学会等名 The 12th International Conference and Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2018) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 . 発表者名 Eiji Miyano, Toshiki Saitoh, Ryuhei Uehara, Tsuyoshi Yagita and Tom van der Zanden |
| 2 . 発表標題 Complexity of the Maximum k-Path Vertex Cover Problem |
| 3 . 学会等名 The 12th International Conference and Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2018) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Folding and unfolding algorithms on (super)computer |
| 3. 学会等名 The 5th International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2017) (招待講演) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroaki Hamanaka, Takashi Horiyama and Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 On the Enumeration of Chequered Tilings in Polygons |
| 3. 学会等名 Bridges (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Dawei Xu, Takashi Horiyama, and Ryuhei Uehara |
| 2. 発表標題 Rep-cubes: Unfolding and Dissection of Cubes |
| 3. 学会等名 Canadian Conference on Computational Geometry (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計6件

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 Ryuhei Uehara | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 Springer | 5. 総ページ数 222 |
| 3. 書名 Introduction to Computational Origami: The World of New Computational Geometry | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 T.C. Hull, M.N. De las Penas, E.C. Taganap, T.A. Rapanut, R. Uehara, H.A. Akitaya, J. Mitani, Y. Kanamori, Y. Fukui, T. Tachi, T.A. Evans, R.J. Lang, S.P. Magleby, L.L. Howell, B.J. Edmondson, M.R. Morgan, J.S. Dai, E.D. Demaine, J.S. Ku, M.L. Demaine(他11人) | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 森北出版 | 5. 総ページ数 288 |
| 3. 書名 折り紙数理の広がり | |

| | |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 上原隆平, 三浦公亮, 奈良知恵, 堀山貴史, 三谷純, 萩原一郎, 関新之助, 繁富(栗林)香織 | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 電子情報通信学会学会誌 | 5. 総ページ数 46 |
| 3. 書名 小特集「折り紙の科学」 | |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 1. 著者名 R. Lang, M. Boliho, Z. You, N. Boakes, C. Budd, Y. Chen, M. Frecker, S. Guest, T. Hull, Y. Klett, J. Mitani, J. Pardo, G. Paulino, M. Schenk, T. Tachi, R. Uehara, and P. Wang-Iverson (Eds) | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 Tarquin | 5. 総ページ数 1367 |
| 3. 書名 Origami 7 | |

| | |
|------------------|-----------------|
| 1. 著者名 上原 隆平 | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 近代科学社 | 5. 総ページ数 260 |
| 3. 書名 計算折り紙入門 | |

| | |
|-----------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 Ryuhei Uehara | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 Springer | 5. 総ページ数 175 |
| 3. 書名 First Course in Algorithms Through Puzzles | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|----|
| 研究 分担者 | 堀山 貴史 (Horiyama Takashi) (60314530) | 北海道大学・情報科学研究院・教授 (10101) | |
| 研究 分担者 | 繁富 香織 (Shigetomi Kaori) (90431816) | 北海道大学・高等教育推進機構・特任准教授 (10101) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|