

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：12605

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K24338

研究課題名（和文）組立・分解性を考慮した分割形状デザイン支援

研究課題名（英文）Computational design of assemblable shape decomposition

研究代表者

北 直樹（Kita, Naoki）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：30712153

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、組立・分解性を考慮した分割形状デザイン、および遠心力を利用したパズルの一般化手法、すなわち任意形状から遠心力パズルを生成する手法を構築した。まず、組立・分解性を考慮した分割形状を、ポリオミノの敷き詰めと容量制約付きグラフ分割手法を組み合わせることで生成する手法を開発した。また、幾何形状だけではなく、重力等の外力も併せて用いなければアンロックできないロック機構を実現する形状を生成する最適化手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低価格な3Dプリンタやレーザーカッターといったデジタル工作機械の普及によりパーソナルファブリケーションは一層身近なものとなりつつある。他方で、所望の形状をデザインすることは経験者であっても困難を伴う。特に実際に組立・分解が可能な形状をデザインすることは一層困難である。本研究結果である組立・分解性を考慮した分割形状デザイン、および重力（外力）を利用したパズルの一般化生成手法は、その様なユーザのデザイン作業を計算機により支援するものであり、今後パーソナルファブリケーションが普及するにつれて一層重要な技術となっていくものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed methods for designing assemblable shape decomposition and generalized centrifugal puzzles. First, we developed an assemblable shape decomposition method by combining polyomino tiling and capacity-constraint graph partitioning. We also developed a computational design method for generating generalized centrifugal puzzles by extending a traditional centrifugal puzzle called DuaLock, in which we have to exploit not only the geometric characteristics of the shape but also the external forces to unlock the puzzles.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：コンピュータグラフィックス デジタルファブリケーション コンピュータシヨナルデザイン

### 1. 研究開始当初の背景

低価格な 3D プリンタやレーザーカッターといったデジタル工作機械の普及によりパーソナルアプリケーションは一層身近なものとなりつつある。他方で、所望の形状をデザインすることは経験者であっても困難を伴う。特に実際に組立・分解が可能な形状をデザインすることは一層困難である。3D プリンタやレーザーカッターには造形可能サイズに制限があるものが多く、造形可能サイズより大きなサイズの造形を行うためには、工作機械の造形可能サイズにおさまるように造形対象物の形状を分割する必要がある。あるいは、造形物が異なった素材の組み合わせで構成される場合には、マルチマテリアルをサポートしていない機材においては素材ごとにパーツをプリントして組み立てるといった作業が必須となる。そのため、分割形状のデザインは、比較的サイズの大きい造形物をプリントしたり、マルチマテリアルで造形する場合、およびパズルのような組立・分解を目的とした物体を造形する際に必要となる。しかし、3次元空間において組立・分解性を考慮したデザインを行うことは熟練者にとっても容易ではない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は組立・分解性を考慮した分割形状のデザイン支援手法を構築することである。特に、組立・分解性を保証しつつ、かつユーザの意図も反映した分割形状のデザイン支援手法について研究を行う。組立・分解が可能な幾何形状として幾何パズルが挙げられる。既存の幾何パズルは立方体など単純な形状が多いが、本研究では分割形状のデザイン支援に加え、幾何パズルの機構を一般化し、複雑な幾何形状の内部にパズル機構を生成する手法についても研究・開発を行う。これらの技術によって、手作業では製作が難しい、あるいは発想それ自体が困難なデザインの幾何パズル生成を支援する。

### 3. 研究の方法

本研究では2つの設計手法の構築を行った。それぞれについて以下で説明を行う。

#### (1) 組立・分解性を考慮した分割形状デザイン手法

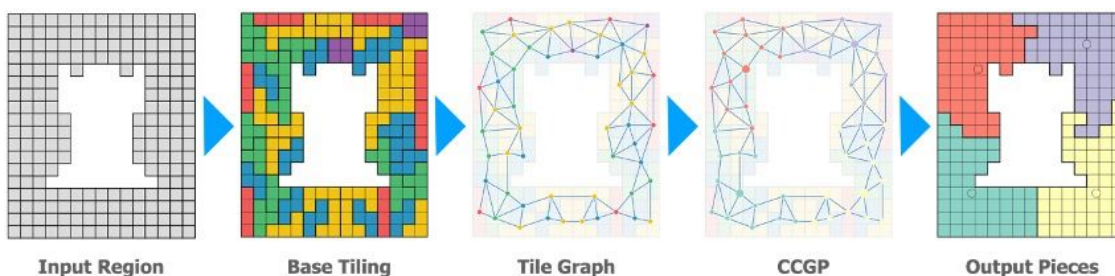


図 1. ポリオミノの敷き詰めと容量制約付きグラフ分割手法を組み合わせた分割形状デザインの手順。

図 1 に組立・分解性を考慮した分割形状デザイン手法の概略を 2次元平面での例で説明する。本手法ではまず、対象領域に対してポリオミノの敷き詰めを行う。図 1 の例ではテトロミノ（正方形が 4つ連結した形状）の敷き詰めを行っている。ポリオミノの敷き詰めは線形計画問題として定式化し、各ポリオミノタイルの出現頻度を制約とすることで基本となる敷き詰め (Base Tiling) を求める。次にタイルの隣接関係からタイルグラフを構築し、このタイルグラフに対して容量制約付きグラフ分割 (CCGP: Capacity-constraint Graph Partitioning) を行う。得られた分割でタイルをグループ化することで最終的な分割形状が得られる。CCGP は対話的速度で計算することができ、ユーザは分割位置をある程度制御することが可能である。当該手法は 3次元ポリキューブへ素直に拡張することができ、3次元形状分割に適用することが可能である。ただし、3次元形状の場合は各ピースが平行移動で他のピースに干渉せずに組立・分解可能であることを保証するためのチェック処理を毎回の CCGP の計算時に併せて行っており、これにより組立・分解が保証された形状分割を達成している。

#### (2) 一般化遠心力パズルのデザイン手法

遠心力パズルはパズルを水平な面上に置き、パズルが水平面に垂直な軸を回転軸として回転する様に力を加えることにより内部のスティックが遠心力で外側に追いやられ内部のロックがアンロックされることで解くことができるパズルである。そのため、パズル形状は底面が平ら、かつ遠心力がどのスティックにも等しく作用するように回転対称な形状でないとうまくアンロックされないという制約がある。本研究では、遠心力が内部のスティックに等しく作用するようにパズル形状の重心を考慮しつつ内部ロック機構 (コア) を実現するための最適化計算を行うことで、任意形状で遠心力パズルを実現する手法を提案する。

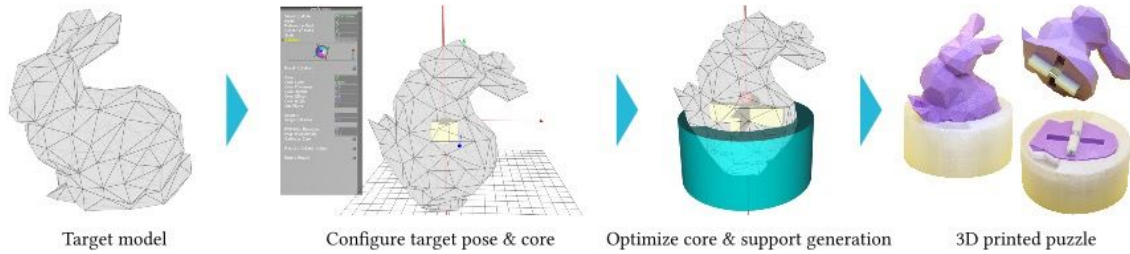


図 2. 一般化遠心力パズルの生成手順.

図 2 に一般化遠心力パズルの生成手順を示す．ターゲット形状に対して，ユーザはパズル機構となるコア形状を対話的に設定する．提案手法では従来の十字のコアに加えて，円筒コアを新たに提案しており，ユーザはいずれかのコア形状を選択可能である．十字コアは 2 パーツのロック / アンロックしかできないが，円筒コアでは円筒を通して内部空洞にアクセスできるようになり，パズル内部にもものを入れることが可能となるため，金庫のような役割を果たすことができる．種々の設定が完了したら「最適化」ボタンを押下することで安定的にアンロックできる最適な場所にコアが位置する様に最適化が行われる．最適化には粒子群最適化を用い，実現するコアのサイズを最大化することを目的関数として設定している．これは，安定してアンロックできるコアの実現にはパーツの精度が要求されるため，できるだけ大きいサイズでコアを造形する必要があるためである．

また，本研究では必ずしも底面が平らであることは要求しておらず，またターゲット形状の姿勢によっては底面が水平でない状態でアンロックされる状況も考えられる．このようなケースにおいて，安定的な回転のためにサポート構造を生成する手法についても提案している．サポート形状を利用した場合でも，パズル本体とサポートを合わせた重心が回転中心となる様にサポート形状の質量分布の最適化を行う．この様なサポートは言わば鍵の役割を果たす．

本提案手法では上記に加え，複数のコアを単一のターゲット形状に埋め込む手法についても提案している．この場合，適切な順序でコアをアンロックする必要が出てくるため，より解くのが難しいパズル（強固なセキュリティ）を実現できる．1 つ目の提案手法では分解・組立に着目したデザイン手法を提案したが，2 つ目の本提案手法では外力として重力（遠心力）も考慮した分割形状デザイン手法を提案している．

#### 4. 研究成果

(1) 組立・分解性を考慮した分割形状デザイン手法による生成結果を図 3 および図 4 に示す．図 3 は内部が充填された四角錐を 3 つの体積の等しいパーツに分割した例である．内部が充填されているため，分割面は複雑に入り組んだ形状となっているが，実際に組立・分解が可能となっている．また，図 4 はより複雑な表面形状を持つ物体を 7 つのパーツに分解したものである．分割されたピース形状はどれも複雑な形状を有しているが，システムの提示する組立手順に従って順に組み合わせていくことで物体の組み立てが可能となっている．この様な制約下での複雑分割形状デザインは計算機の支援なしでは困難であり，本研究のデザイン支援における有用性を示している．

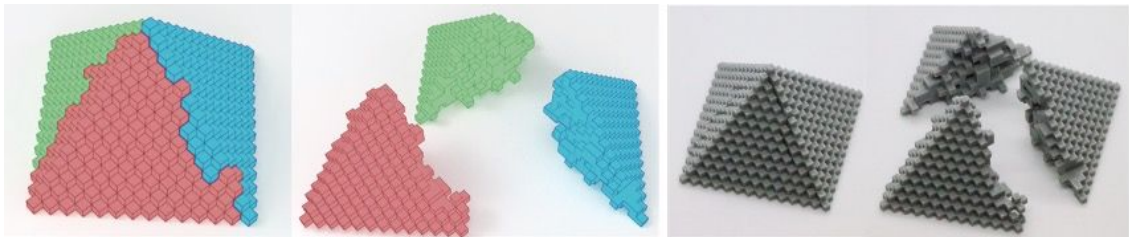


図 3. 四角錐を体積の等しい 3 パーツに分割した例．分割面は複雑だが実際に組立・分解が可能となっている．



図 4. より複雑な 3 次元形状を 7 パーツに分割した例．



(2) 一般化遠心力パズルの生成結果を図5に示す。1行目(Spot)の例では、十字コアのパズル形状生成を行った。2行目(BumpyCube)の例は円筒コアを用いた結果である。円筒内が空洞となっており、ものを入れることができる構造が実現できていることが分かる。3行目(3-Icosahedron)は2つの十字コアを埋め込んだ例である。正しい順序でアンロックされない場合、重心位置が安定的にアンロックできる位置とならないため、すべてのコアをアンロックできなくなる。予め指定した順でアンロックした場合のみすべてのコアをアンロックすることが可能となる。このような構造は強固なセキュリティを有する構造物への応用が期待できる。



図3. 一般化遠心力パズルの生成結果。上段から順に、十字コア、円筒コア、マルチコアの生成結果例を示している。

以上の2提案手法により、組立・分解性を考慮した分割形状デザイン、外力(重力)を利用したパズル形状のデザイン手法が構築できたと言える。また、これらの提案手法は、より滑らかな分割面生成への応用や、より汎用的に外力を扱える手法へと拡張することも考えられ、分割形状デザインのさらなる進展に寄与するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kita Naoki, Miyata Kazunori	4. 巻 37
2. 論文標題 Computational design of polyomino puzzles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Visual Computer	6. 最初と最後の頁 777 ~ 787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00371-020-01968-5	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 Kita Naoki, Saito Takafumi	4. 巻 90
2. 論文標題 Computational design of generalized centrifugal puzzles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Graphics	6. 最初と最後の頁 21 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cag.2020.05.005	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 Kita Naoki, Cliquet Gregoire, Miyata Kazunori	4. 巻 109
2. 論文標題 Mapping two-dimensional plots to a spherical surface using elliptical grid mapping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Graphical Models	6. 最初と最後の頁 101067 ~ 101067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gmod.2020.101067	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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kita Naoki, Miyata Kazunori
2. 発表標題 Computational design of polyomino puzzles
3. 学会等名 Computer Graphics International 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kita Naoki, Saito Takafumi
2. 発表標題 Computational Design of Generalized Centrifugal Puzzles
3. 学会等名 Shape Modeling International 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kita Naoki, Cliquet Gregoire, Miyata Kazunori
2. 発表標題 Mapping Two-Dimensional Plots to a Spherical Surface using Elliptical Grid Mapping
3. 学会等名 CVM 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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

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		
フランス	L'ecole de design Nantes Atlantique		