様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　５ 年　 ６ 月　 ８ 日現在

機関番号：１２６０５
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2022
課題番号：２０Ｋ１９９４４

研究課題名（和文）制作工程を考慮したプロシージャル生成手法の構築

研究課題名（英文）Procedural generation methods that takes into account the production process

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）　　3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではコンピュータグラフィックスコンテンツの手続き的な形状生成手法であるプロシージャルモデリングの実物製造への応用として、3Dプリンタ等のデジタル工作機器を用いて実物を製造する際の製造性、および工作機器を用いたパーツの出力から組み立て等の後工程を経て完成に至るまでの制作工程における「ユーザにとっての作りやすさ」、すなわち作業性を考慮したプロシージャル生成手法の構築に取り組んだ。主な研究成果として、シリコンでの型取りによる3D形状の複製を行う際のモールドの離型可能性を考慮したプロシージャルモデリング手法、およびギフトラッピングのためのテクスチャ生成手法の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
低価格な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。しかし、ソフトウェア上でデザインした形状が問題なく3Dプリント可能なものになっているかデジタル工作機の物理的制約を考慮しつつデザインする必要があったり、パーツとして分割して出力したものを組み立てる場合には手間がかかるなど、身近にはなったが手軽になっているとは言い難い。本研究成果は、そのような制作工程上の手間を削減するものであり、パーソナルファブリケーションの民主化を促進することが期待できるため社会的意義は大きい。また、まだまだ未開拓の領域であり学術的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：In our study, we focused on applying procedural modeling, a shape generation approach for computer graphics content, to the production of physical objects. This involved crafting a procedural generation technique considering the manufacturability of objects made via digital machine tools like 3D printers. Additionally, we sought to optimize the "ease of manufacturing for users," known as workability, from the initial machine tool output to the final assembly and finishing steps. Key research outcomes included a procedural modeling method cognizant of mold removability during 3D silicon molding replication, and a texture generation approach specifically designed for gift wrapping. Our work aims to streamline production, integrating user-friendly techniques from machine tool operation to post-production procedures like assembly.

研究分野：Computer Graphics

キーワード：Computer Graphics　Computational Design　Digital Fabrication

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

低価格なデジタル工作機械の普及によりデジタルファブリケーション、特に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。しかし、ソフトウェア上でデザインした形状が問題なく 3D プリント可能なものになっているかデジタル工作機の物理的制約を考慮しつつデザインする必要がある、あるいはパーツとして分割して出力したものを組み立てる場合には手間がかかるなど、身近にはなったが手軽になっているとは言い難い。

プロシージャルモデリングはパラメタを変えるだけでバリエーション豊かな 3D 形状を容易に生成することができるため、映画やゲームだけでなく様々な映像コンテンツ制作に用いられる。しかし多くの場合、設定可能なパラメタ数が膨大になり、所望の形状を生成する適切な値域設定を行うことも容易ではない。加えて、CG においてはもっともらしい見た目のモデルを効率的に作ることに重きが置かれることが多く、物理的に製造することまで考慮した生成についてはあまり省みられてこなかった。

２．研究の目的

本研究では、デジタルファブリケーションにおける制作工程を総合的に考慮したプロシージャル生成手法の構築を目的とする。特に、工作機器を用いて製造する際の物理的な製造性だけでなく、製造後に組み立てを要するモデルの場合にはユーザによる「組み立てやすさ」などの作業性、その他ユーザによるデザイン制約等を、モデル形状生成のためのパラメタ空間上の制約として考慮したプロシージャル生成手法を構築し、ユーザのパラメタ空間探索を支援する仕組みを確立する。

３．研究の方法

本研究では、作業性を考慮した包括的な制作工程上の制約を満たすプロシージャル生成手法の構築を目標とする。特に、原型となる 3D 形状の複製、および展開図やパーツの組み立て作業を支援する手法の構築等に取り組む。本研究では、主に次の 2 手法の構築に取り組む。

(1) 複製のための型取り用原型モデルのプロシージャル生成手法の構築
(2) ギフトラッピングのためのテクスチャ生成手法の構築

(1)では、特にシリコンでの型取りによる 3D 形状の複製を行う際のモールドの離型可能性に考慮したプロシージャルモデリング手法を構築する。また、取り組むにあたって水晶モデルを対象とする。これは、水晶の構造が結晶工学に基づいてモデリング可能であり、また水晶のレジンアクセサリーはハンドメイド作品も多く、本トピックに適していると考えたためである。まず、結晶工学に基づいた水晶の単晶の 3D 形状をパラメトリックに表現することでプロシージャル生成可能にする。続いて、水晶の群生（クラスター）をモデリングするために母岩上に点をサンプリングし、単晶にパラメタ摂動を加えたうえで点上に配置する。実装は 3DCG ソフトウェアの Houdini で行った（**図 1**）。次に、二股になっている双晶モデルに対し、様々な開き角度を設定したものを 3D プリントし、シリコンモールドを作成してレジン複製を行う（**図 2**）。レジン複製の離型のしやすさを 5 段階で評価し、シリコンモールドの破損や離型難易度を考慮してオーバーハングの角度を算出し、パラメタ空間の制限に反映する。これにより、シリコンモールドを破損せずに離型可能な原型モデルのプロシージャル生成が可能となる。

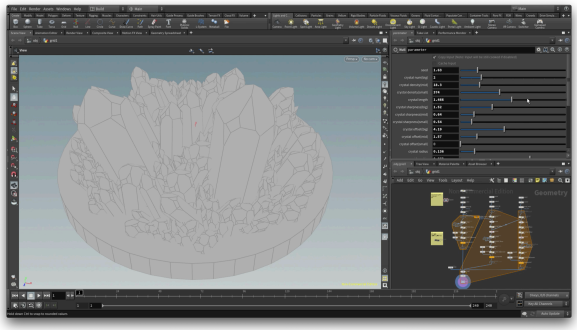

図 1 Houdini 上に実装した提案手法

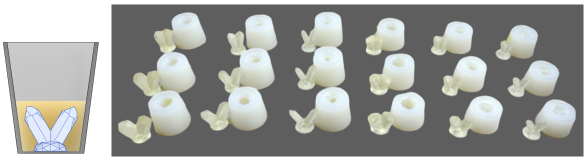

図 2 様々なオーバーハングアングルのレジン複製を作成し、シリコンモールドからの離型テストを実施

(2)では、ギフトラッピングのためのテクスチャ生成手法の構築に取り組む。特に、「斜め包み」と呼ばれる包み方で直方体の箱を包む際に、包装後にラッピングペーパーの模様が折り目等のあらゆる箇所で破綻なく連続的に繋がるようなラッピングペーパーの模様の生成に取り組む。またここではストライプパターンに焦点を当てて取り組む。箱の 3 辺の長さから、その箱を包むのに必要なラッピングペーパーの最小サイズ、および箱の位置を求める。箱の展開図を考え、箱

の上面をメイン面と定義し、メイン面にストライプを生成し、展開図の他の面へストライプを伸ばしていく。展開図とその組み立てたときの関係から、適切に鏡映変換等でストライプを成長させてすべての面を被覆することでストライプパターンを生成する。グラフィッカルユーザインタフェースを作成し、ユーザが箱に対するストライプの角度やストライプの配色などを指定できるようにする。

４．研究成果

(1) 複製のための型取り用原型モデルのプロシージャル生成手法の構築

図 1 のシステムで生成した水晶クラスターを**図 3** に示す。

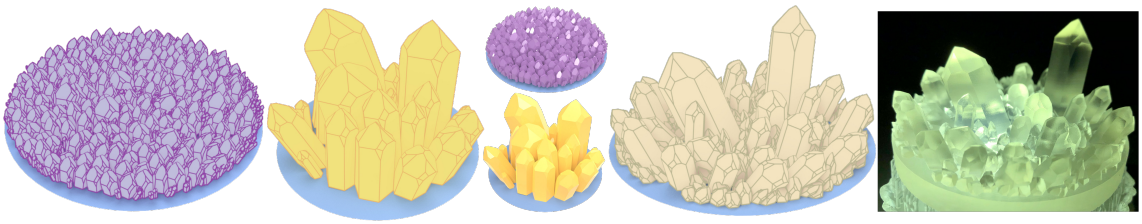

図 3 提案手法で生成した水晶クラスター（紫：アメジスト、黄：シトリン）、および光造形 3D プリンタで出力した水晶クラスター（右）

パラメタを適切に設定することで、アメジストやシトリンなど、様々な特徴を持つ水晶がモデリング可能であることが確認できた。**図 3 右**に示すように、モデリングした水晶クラスターは光造形タイプの 3D プリンタでサポートを使用せずに出力可能である。これは、サポートを使用せずに出力可能なオーバーハング角度となるような制約下で水晶クラスターをモデリングしたためである。これにより、サポート除去という手間が不要となり、出力品の表面品質も保たれる。また**図 4** に示すように、概形形状を与えることで、その概形を近似するかたちで水晶クラスターを生成することが可能である。これは、よりユーザの意図を反映したオリジナルの水晶レジンアクセサリーの製作においてのみならず、映画やゲームなどでアーティスティックな制御が必要な場合等でも有効である。

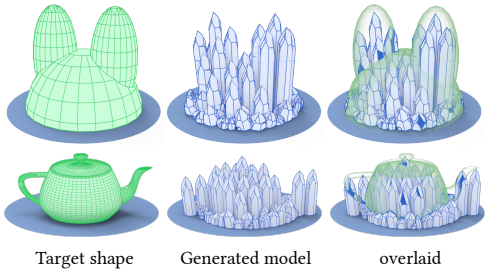

図 4 所望の概形を近似するモデル生成

(2) ギフトラッピングのためのテクスチャ生成手法の構築

作成したギフトラッピングペーパー生成システム**図 5** に示す。左ペインで包みたい箱の 3 辺の長さやストライプカラーを指定すると、右上ペインに計算された箱のラッピングペーパー上の位置が表示され、右舌にラッピングペーパーのパターンが表示される。ストライプの角度は破綻しない範囲でスライダーで調節可能となっている。**図 6** に示すように、生成されたラッピングペーパーを印刷して実際の箱を包むと、折り目等でもストライプパターンが破綻せずに連続的に繋がっている様子が確認できる。このようなラッピングを計算機の支援なしに行うことは困難であり、提案手法を用いることにより、より贈答用のラッピングとしてふさわしい包装が可能となったものと考える。

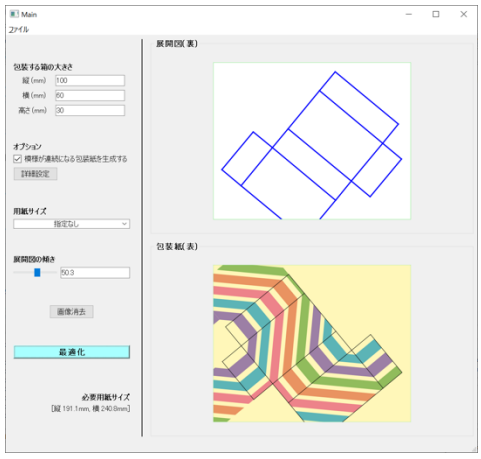

図 5 ギフトラッピングペーパー生成システム

図 6 生成したラッピングペーパーで実際に箱を包んだ様子

以上の成果から、コンピュータ上で物理的に製造可能なデザインをプロシージャルに生成することが可能であり（1 の成果）、かつ計算機による支援なしでは困難な付加価値のあるデザインが（特定の対象物に関して）可能であることが確認できた（2 の成果）。現在は特定の対象物に対する手法となっているが、今後より汎用的な手法を構築していく上での第一歩となったと考える。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計5件（うち査読付論文　5件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　3件）

１．著者名 菅原万梨夏，田村崚，北直樹，斎藤隆文	４．巻 50
２．論文標題 模様の連続性を担保した包装紙デザインの自動生成	５．発行年 2021年
３．雑誌名 画像電子学会誌	６．最初と最後の頁 419-424
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 玉置尚吾，北直樹，斎藤隆文	４．巻 50
２．論文標題 グラフィックデザインのためのセマンティクスを考慮した色候補生成	５．発行年 2021年
３．雑誌名 画像電子学会誌	６．最初と最後の頁 277-283
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 安部龍馬，北直樹，斎藤隆文	４．巻 50
２．論文標題 モアレを用いた多彩な動き生成	５．発行年 2021年
３．雑誌名 画像電子学会誌	６．最初と最後の頁 265-271
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 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、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 －

〔学会発表〕　計8件（うち招待講演　1件／うち国際学会　5件）

1．発表者名 Kita Naoki, Tsukii Satoshi, Tsuru Miwako
2．発表標題 Procedural Modeling of Crystal Clusters
3．学会等名 SIGGRAPH Asia 2022（国際学会）
4．発表年 2022年

1．発表者名 Kita Naoki, Kawasaki Shiori, Saito Takafumi
2．発表標題 Palette-based Image Search with Color Weights
3．学会等名 SIGGRAPH Asia 2022（国際学会）
4．発表年 2022年

1．発表者名 川崎 詩織，北直樹，斎藤 隆文
2．発表標題 色比率を考慮したパレットベース画像検索
3．学会等名 NICOGRAPH 2022
4．発表年 2022年

１．発表者名
Naoki Kita

２．発表標題
Designing Patterns That Exploit Human Visual System

３．学会等名
2nd International Symposium on Intelligence Design (ISID 2022)（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
菅原 万梨夏，田村 崚，北 直樹，斎藤 隆文

２．発表標題
模様の連続性を担保した包装紙デザインの自動生成

３．学会等名
第28回 Visual Computing (VC 2020)

４．発表年
2020年

１．発表者名
北 直樹，月井 智史，都留 美和子

２．発表標題
水晶のプロシージャルモデリング

３．学会等名
第28回 Visual Computing (VC 2020)

４．発表年
2020年

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

〔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