

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K12678
研究課題名（和文）ジェネレイティブデザインの学術的枠組みの基礎構築とそれに基づくデザインシステム

研究課題名（英文）Fundamental construction of scientific framework for generative design and its applications

研究代表者
佐藤 浩一郎（Sato, Koichiro）

千葉大学・デザイン・リサーチ・インスティテュート・准教授

研究者番号：40598330
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間が実行することが難しい膨大な計算から新奇性に富むデザイン解を導出できるGenerative Design (GD) 研究における学術的基盤となりうる枠組みの基礎構築とその枠組みに基づいた形や構造のデザインシステムの提案を行った。具体的には、創発性と最適性を主体とした枠組みを提案するとともに、新奇性や多様性を創出する創発性を主としたGD研究における多様な形状を生成するための3種類の手法を提案し、その有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で示されたGD研究の枠組みを明示したことで、他の研究者におけるGD研究の指針としての利用や同枠組みに基づく手法や知見の蓄積により、学術面での同研究領域の発展が期待できる。また、GD研究における手法が蓄積されていくことで、Additive Manufacturingとの連携も促進され、機能面や意匠面において新奇性や多様性に富む人工物のデザインが可能になる。その結果、産業面における新たな付加価値を持つ人工物デザインの一助となることが考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed a scientific framework for research of Generative Design (GD) which can derive novel design solutions from enormous calculations, and the design system for generating shapes and structures based on this framework. Specifically, first, a framework focusing on emergence and optimality was proposed. Moreover, we proposed a category of GD research focused on emergence, and diverse shapes were obtained by executing shape generation by each of the three proposed design systems (shape generation methods).

研究分野：デザイン科学

キーワード：Generative Design Additive Manufacturing DfAM Shape generation method 創発デザイン デザイン科学

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

ICTの普及によるIoT化がもたらす知的処理能力の機械化⁽¹⁾、モノのデザインからコトデザインへの拡張、および物質的価値から精神的価値への移行⁽²⁾など、産業に関わる環境は目まぐるしく変化している。これらの変化は、創造力や発想力といった人間特有の行為にもその範囲を拡大してきており、人間が実行することが難しい膨大な計算から新奇性に富むデザイン解を導出できるGenerative Design (GD)が台頭している。GDは、単なるデザインや設計の自動化にとどまらず、効率化⁽³⁾や性能⁽⁴⁾の向上に貢献している。このようなGD研究領域は、ICTの普及やIoT化の過渡期において今後さらに発展していくことが予想される。

GD研究は、建物の外形デザイン、空間のレイアウト、および都市計画といった建築の領域において多くの報告がなされている。しかしながら、ものづくりの中核をなすデザイン領域において、ものの形や構造の創出に関する研究は少なく、建築領域と比較して遅れている。

この要因として、以下の2点が考えられる。1つ目は、GDで得られるデザイン解は複雑な形状特徴を有していることが多く、工業化のための製造方法が確立されていないことが挙げられる。2つ目は、知識や知見を蓄積するための学術的基盤となる枠組みがなく、体系的な視点やそれらに基づく手段や手法が不足していることが挙げられる。前者については、Additive Manufacturing (AM)技術の発展により、様々な材料による3Dプリンティングや大量生産向きの3Dプリンタが実用化され始め、改善に向かいつつある。しかしながら、後者については、未だ解決すべき重要な課題として位置づけられる。このような製造方法の確立がなされ始めるなかで、学術的枠組みの確立や手段・手法の開発は急務といえる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、GD研究の学術的基盤となりうる枠組みの基礎構築とその枠組みに基づいた形や構造のデザインシステムの提案を行っている。前者において、GD研究における目的、デザイン対象、および用いられている手法等の時系列変化に着目し、それらの特徴を明確にすることで枠組みの基礎構築を実施している。また、後者においては、GD研究の枠組みに基づいたデザインシステム（形状生成システム）の提案を行う。さらに、提案したデザインシステムを用いて形状を生成し、その有用性を確認した。

3. 研究の方法

3.1. GD研究の学術的基盤となる枠組みの提案

1990年から2018年までの研究論文を分析対象として、論文が設定している目的、用いられている手法、およびデザイン解として導出されている対象を抽出した。つぎに、抽出された項目をまとめるとともに、Singh⁽⁵⁾やNordin⁽⁶⁾におけるGenerative Design手法の体系的な記述を参考にし、以下のような評価項目を設定した。設定している目標として、形状等のバリエーションを導出する問題（バリエーション）、最適なデザイン解を導出する問題（最適性）、今までにない新しいデザイン解（新奇性）、および種類がことなる多様なデザイン解を導出する問題（多様性）を設定した。また、各研究でデザイン問題を解くために用いられている手法（Shape Grammar (SG)系、Genetic Algorithm (GA)系、Cellular Automaton (CA)系、Swarm intelligence (SI)系、L-System (LS)系、Simulated Annealing (SA)系、Artificial Intelligence (AI)系、最適化法、モデリングソフトウェア）を設定した。さらに、デザイン解として、導出されている環境、建築、およびプロダクトなどといった対象を設定した。さいごに、これらの評価項目に基づき、対象論文の評価を行った。そして、分析結果をデザイン科学の知見を用いて枠組みの基礎構築を行っている。

3.2. GD研究の枠組みに基づく形状生成システムの提案と検証

3.1節で述べた手順で得られた枠組みに基づいて、3つのデザインシステム（形状生成システム）を提案している。具体的には、うねりやねじれなどの表面形態を創出する方法、表面の微細な構造や凹凸を創出するための手法、および内部形態全体の形を創出するための手法である。また、それぞれについて生成形状の特徴を明確にするための検証を実施している。

4. 研究成果

4.1. GD研究の枠組み

文献調査の結果、研究が活発化した2016年から2018年におけるGD研究領域に着目した。同年代における特徴を図1に示す。同図から、創発性を主としたGD研究と最適性を主としたGD研究に大きく大別した。創発性を主としたGD研究では、導出するデザイン解の多様性や新奇性を目的として、不明確な目標や少ない条件下で大域的な解探索を行う。一方、最適性を主としたGD研究では、導出するデザイン解の最適性を目的として、明確な目標や多くの条件下で局所的

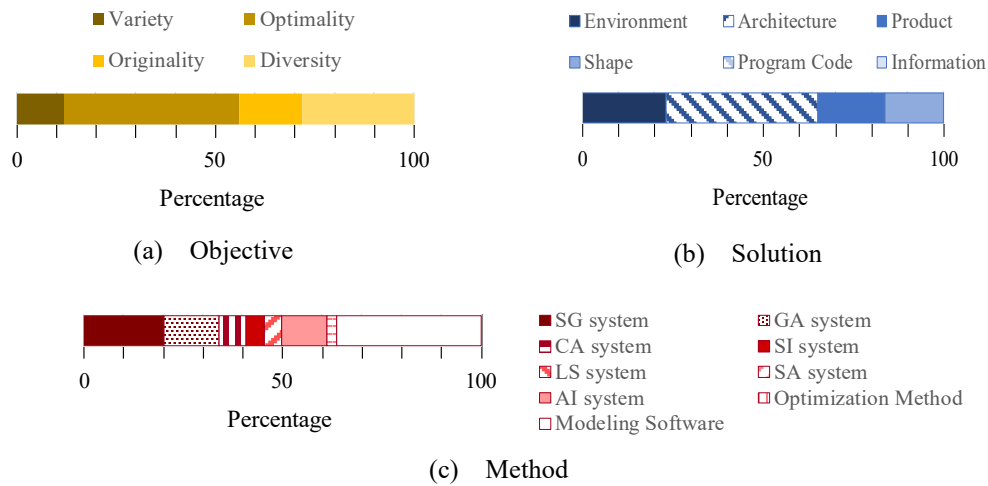


Figure 1 Features of GD research in 2016-2018

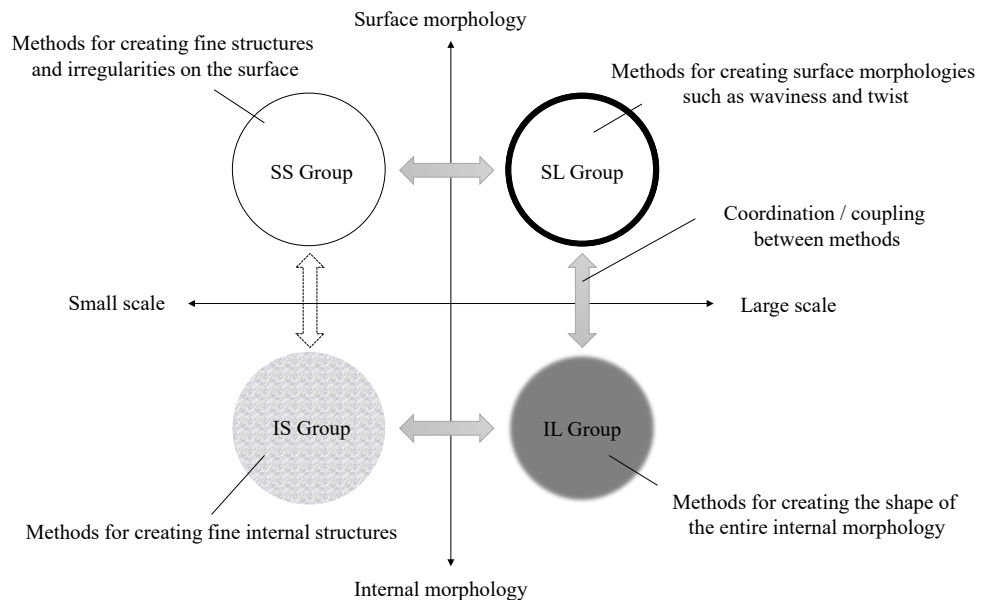


Figure 2 Framework of application area

な解探索を行う。

また、環境・建築物を対象とした GD 研究の割合は多いが、プロダクトや形態を対象とした GD 研究の割合は少ないことがわかった。そのなかでも、プロダクトや形態を対象とした創発性重視の GD 研究は、54 件 (2016-2018) 中 2 件であった。創発性を主とすることは、上流過程での新奇性に富むデザイン解の発想支援に繋がり、今までにない新しいデザイン解を創出するために必要となる。そのため、プロダクトのようなモノの形態に適用可能な GD 手法が求められる。

そこで、プロダクトや形態を対象とした創発性重視の GD 手法の枠組みを図 2 のように提案した。同枠組みは、生成する形態の範囲 (部位) とそのスケールに基づいており、範囲は大きく 4 つのグループに分けられる。

SL Group は、大きな凹凸などの表面形態を対象としており、工業デザインにおけるスタイリングに相当する生成手法が分類されるグループである。SS Group は、微小なスケールでの表面形態を対象としており、鮫の肌のような形態を生成する手法が分類されるグループである。IS Group は、対象となる形態の内部の微小な構造を対象としており、人の海綿骨のような形態を生成する手法が分類されるグループである。IL Group は、全体の形態を対象としており、形態の位相 (トポロジー) を生成する手法が分類されるグループである。具体的な GD 手法を開発していく際には、各グループにおける形態の特徴や特性に応じたモデリングの設定やルールの開発を行っていく必要がある。

IL Group は、全体の形態を対象としており、形態の位相 (トポロジー) を生成する手法が分類されるグループである。具体的な GD 手法を開発していく際には、各グループにおける形態の特徴や特性に応じたモデリングの設定やルールの開発を行っていく必要がある。

4.2. GD 研究の枠組みに基づく形状生成システム（方法）

①断面制御による多様な曲面形状の生成方法

本方法は形状の断面の変化に着目した生成方法であり、SL Group に分類される。曲面形状は、その形状を通過する任意の平面で自己交差のない閉曲線からなる断面形状を形成する。その断面形状は、曲面を通過する平面の垂直方向への移動にともない、連続的に変化する。逆の手順をたどれば、連続的に変化する閉曲線を垂直方向に積み重ねることで曲面が形成される。そこで、断面形状を制御することによって曲面を生成する方法を提案している。この生成方法は、同一平面における閉曲線の数を増減や、閉曲線の内部に空白となる別の閉曲線を追加によって、入り組んだ曲面や穴の開いたような曲面といった複雑な形状であっても生成することが可能である。

断面形状の制御方法によって生成される曲面形状が変化するため、複数の生成パターンを作成し曲面生成を試行した。まず、3D CAD ソフトウェアである Rhinoceros と統合したプログラミング言語 Grasshopper を用いて 4 つの生成パターン F,G,H,I を作成した。次に、各パターンから生成された曲面形状が有する印象を評価するための実験を行った。印象評価実験のために、生成パターン F,G,H,I から生成した形状の各 3 個ずつ、計 12 個の曲面を選出し、3D プリンタを用いて実物の曲面サンプルを制作した(図 3)。最後に、21 個の評価尺度を設定し、7 段階 SD 法を用いて 12 個の曲面サンプルに対する印象評価実験を実施し、その結果に対して主成分分析を実行した。その結果、生成形状に対する印象を「複雑さ」、「動き」、「先鋭」に集約できることがわかり、様々な印象の持つ形状を生成できることを示した。

②ボロノイ図を利用したテクスチャ創出方法

本方法は、SS Group に分類され、ボロノイ図を利用した孔と凹凸のテクスチャに着目している。Grasshopper を用いることで、任意のサーフェス上にボロノイ図の母点と同じ数だけの孔や凹凸を生成することができる。加えて、ボロノイ図の母点の位置を制御することで、同一曲面上に生成される孔や凹凸の分布に疎密をつくり出すことや、孔や凹凸の大きさや高さに変化や勾配を付与することが可能である。実際に、孔と凹凸それぞれに着目した形状を生成した。

孔のテクスチャにおいては、形状を決定する 2 つの要素をパラメータとした。1 つ目は表面に対する母点の分布であり、これが形状表面の孔の位置を決定する。このボロノイ図の母点の分布を、「ランダム」、「水平方向に勾配」、「鉛直方向に勾配」の 3 種類を用意した。2 つ目は、孔の大きさを決定するパラメータである。ここでは、「一定」、「水平方向に勾配」、「ランダム」の 3 種類を用意した。このパターンを組み合わせた 9 種類の形状を作成した。凹凸のテクスチャについても同様に、形状を決定する 2 つの要素をパラメータとした。1 つ目は表面に対する母点の分布であり、これが形状表面の凸の中心の位置を決定する。これを「ランダム」、「水平方向に勾配」、「鉛直方向に勾配」の 3 種類とした。2 つ目は、凸部分の高さを決定するパラメータである。ここでは、「一定」、「水平方向に勾配」、「ランダム」の 3 種類とした。このパターンを組み合わせた 9 種類の形状を生成した。

以上 18 種類の形状全てを grasshopper で作成し、積層方式 3D プリンタによって出力した。なお、図 4 に、上述のパラメータのパターンによって作成した 3D モデルと出力した形状の例を示す。これらの形状が持つ印象を確認するため、印象評価実験を実施した。その結果、孔や凹凸の分布や大きさをパラメータとして制御し変化させることで、人が見た目や触り心地から受ける

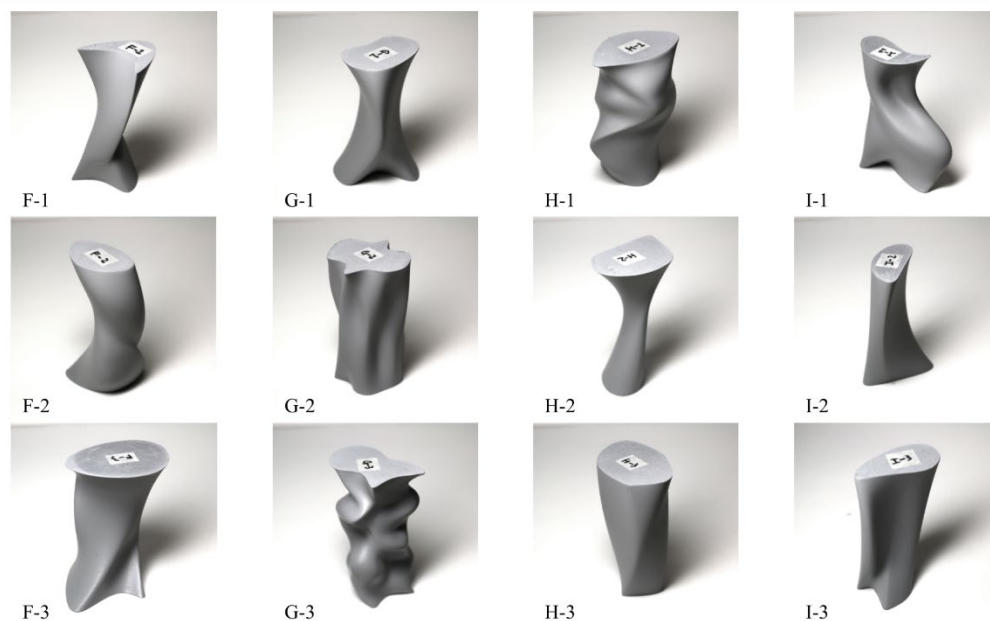


Figure 3 Examples of generated shape

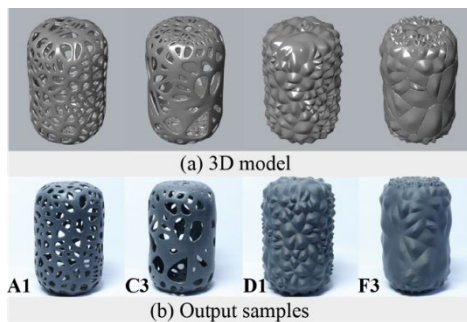


Figure 4 Examples of each texture samples

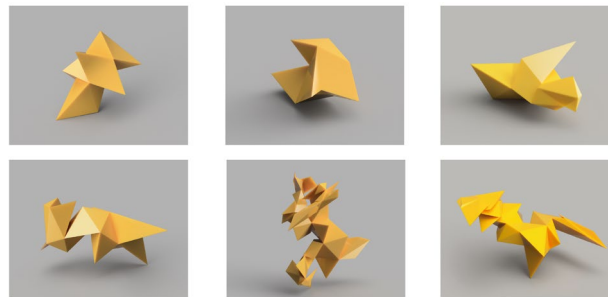


Figure 5 Examples of generated shape using tetrahedron

「方向性」や「安心感」の印象も変化することを確認した。このことは、3D プリントで出力する造形物に対して、パラメータによる数値制御によって、「方向性」や「安心感」が多様に変化する形状を生成することができる可能性を示唆している。具体的には、孔や凹凸のテクスチャについて、円柱形状の側面に対して孔や凹凸の大きさに水平な方向の勾配を加えると、方向性を感じやすいテクスチャとなり得ることや、微小な孔や凹凸を密集させると安心感の低いテクスチャになり得ることが示された。

③四面体を要素とした形状生成システム

本方法は形状を構成する要素として四面体に着目した生成方法であり、IL Group に分類される。四面体の各面から新たな四面体を生成することを繰り返すことにより、形状を生成する方法を提案した。これにより、ボクセル要素を用いた形状生成よりも形状表現の自由度が高い形状が生成される。形状生成時のパラメータとして、「生成空間の大きさ」、「生成空間の大きさに影響を受けるベクトルの合成比」および「隣接する要素を結合する際の閾値」の3つを設定した。形状を生成した結果、図5に示すように様々な特徴を有する形状が生成されることを確認した。

4.3. 成果まとめと今後の展望

本研究では、人間が実行することが難しい膨大な計算から新奇性に富むデザイン解を導出できるGD 研究における学術的基盤となりうる枠組みの基礎構築とその枠組みに基づいた形や構造のデザインシステムの提案を行った。具体的には、前者において、創発性と最適性を主体とした枠組みを提案するとともに、新奇性や多様性を創出する創発性を主としたGD 研究の4つの枠組みを示した。またこれらの枠組みに基づくデザインシステムのための形状生成方法を3種類提案し、その有用性を示した。

今後は、本研究で提案した形状生成方法を拡張し、具体的な人工物への適用を行っていくとともに、GD 研究における枠組みの拡充や詳細化を経て同研究領域の発展に貢献していく。

参考文献

1. 関 啓一郎, “「インダストリー4.0」と「IoT」を理解するための基礎～業務プロセスのIoT化・モジュール化”, 知的財産創造, 2016年3月号(2016), pp.72-107.
2. 内閣府「国民生活に関する世論調査」: <https://survey.gov-online.go.jp/h29/h29-life/2-2.html>, 参照日 2018年10月7日
3. Gunpinar, E. and Gunpinar, S., “A shape sampling technique via particle tracing for CAD models”, Graphical Models, Vol. 96(2018), pp.11-29.
4. Byrne, J., Cardiff, P., Brabazon, A. and O’Neill, M., “Evolving parametric aircraft models for design exploration and optimisation”, Neurocomputing, Vol. 142 (2014), pp.39-47.
5. Singh, V., “Towards an integrated generative design framework”, Design Research Society, Design Studies, Vol.33, No.2 (2012), pp.185-207.
6. Nordin, A., “Challenges in the industrial implementation of generative design systems: An exploratory study”, Artificial Intelligence Engineering Design, Analysis Manufacturing, Vol. 32, No. 1 (2018), pp. 16-31.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Sakutaro MIYASAKA, Fumio TERAUCHI, Koichiro SATO
2. 発表標題 Application of Computational Design for creation of novel texture
3. 学会等名 iDECON/MS 2021 International Design and Concurrent Engineering Conference 2021 & Manufacturing Systems Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤浩一郎, 宮坂朔太郎, 寺内文雄
2. 発表標題 形状多様性を目的とした DfAM手法の基礎的枠組み
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮坂 朔太郎, 佐藤 浩一郎, 寺内 文雄
2. 発表標題 コンピューショナルデザインと AM 技術を用いたテクスチャ創出とその印象評価
3. 学会等名 日本機械学会 第31回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤浩一郎, 宮坂朔太郎, 寺内文雄
2. 発表標題 多空間デザインモデルを用いた創発デザインの表現方法に関する一考察
3. 学会等名 日本機械学会 第31回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤浩一郎
2. 発表標題 創発の概念に基づく"AM×多様解"の設計方法論
3. 学会等名 一般社団法人 日本3Dプリンティング産業技術協会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 浩一郎, 小林 弘侑, 寺内文雄
2. 発表標題 多様な曲面形状生成と生成形状の評価
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第27期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林弘侑, 寺内文雄, 佐藤浩一郎
2. 発表標題 断面形状の制御による多様な曲面の生成と評価
3. 学会等名 日本機械学会 第30回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤浩一郎, 小林弘侑, 寺内文雄
2. 発表標題 創発性を重視した多様解導出方法のフレームワーク試論
3. 学会等名 日本機械学会 第30回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koyu KOBAYASHI, Koichiro SATO, Fumio TERAUCHI
2. 発表標題 Generation of Diverse Curved Surface by Controlling the Cross-sectional Shape
3. 学会等名 iDECON/MS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤浩一郎、木山順正、小林弘侑、寺内文雄
2. 発表標題 Generative Design研究における創発性と最適性
3. 学会等名 日本機械学会 第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木山順正、佐藤浩一郎、寺内文雄
2. 発表標題 ダムエージョントを用いたジェネレーティブデザイン手法の試行
3. 学会等名 日本機械学会 第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林弘侑、佐藤浩一郎、寺内文雄
2. 発表標題 多様な曲面形状の生成に向けた断面形状の制御方法
3. 学会等名 日本機械学会 第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	寺内 文雄 (Terauchi Fumio) (30261887)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	

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
---------	---------