

# 形状における新奇性と複雑さの定式化と逆問題への応用

新奇性と複雑さを制御可能な形状生成システムの開発

Formulation of Novelty and Complexity in Shape and its Application to Inverse Problems · Development of a shape generation system capable of controlling novelty and complexity

本多詩聞<sup>1)</sup> 柳澤秀吉<sup>1)</sup> 加藤健郎<sup>2)</sup>

Honda Shimon<sup>1)</sup> Yanagisawa Hideyoshi<sup>1)</sup> Kato Takeo<sup>2)</sup>

1) 東京大学大学院工学系研究科 2) 慶應義塾大学大学院理工学研究科

Abstract: Aesthetic shape of design is one of the essential elements in enhancing the attractiveness of a product. In this study, we formulated novelty and complexity in shape perception based on a theory of aesthetics, which states moderate novelty and complexity bring about the most pleasant feelings. Using this

Key Word: Aesthetics, Shape Generation, Kansei Design

formulation, we developed a computational system that can generate shapes with the desired degree of novelty and complexity. We conducted experiments with participants to verify the shape samples generated by the system with respect to their beauty and interest as well as novelty and complexity.

## 1. 研究の背景と目的

設計は、要求機能に対して解が無数に存在する不良設定問題である。設計者は力学などの知識と、自身の勘や経験を統合して解を模索するが、いかにすぐれた設計者であっても、強度やコストなどあらゆる要求を加味した最良の設計を見出すことは難しい。

こうした困難を支援する手法として、製品の要求機能に応じて望ましい設計解を提案する最適設計の研究がなされてきた。とくに物理現象を扱う機能設計の分野では、形状最適化やトポロジー最適化が実装され、強度の最大化や軽量化などの用途で製品開発に応用されてきた。こうした最適設計は、最適化したい評価関数が、応力や質量のように定式化、定量化されているゆえ可能となっている。

感性設計の分野においても、形状の官能評価を考慮できる対話型の設計支援システムの研究がなされてきた。しかしこれらの研究で提案されたものの多くは、ユーザの主観評価に基づいて所望の形状を決定するデータ駆動型のシステムであり、得られたデータの範囲内でしか評価を予測できないため、未知の設計解の外挿に向かない。加えてこうしたシステムの出力は、形状を評価したユーザの主観や嗜好、経験などを反映した形状であり、他人もその形状に同じ印象を抱くとは限らない。

形状の官能評価における要素の一つに「美しさ」がある。美しさの定式化をめぐるのは、現在まで一定の支持を得ている理論が存在する。Berlyne [注 1]は、適度な新奇性と複雑さの度合いが快感を最大にするという、覚醒ポテンシャル理論を提唱した。これに対するアンチテーゼとして、Winkelmann [注 2]は、対象の流暢性が美しさを高めるとする流暢性理論を提唱した。さらに、Graf [注 3]は両者の議論を統合して、美しさには「無意識的な過程」を伴う直観的でシンプルな美しさ(=無意識的な美)と、「意識的な過程」を伴い、知覚に時間を要する複雑な美しさ(=意識的な美)があり、条件によってどちらで評価されるかが異なるとするPIAモデルを提唱した。PIAモデルでは、前者は流暢性理論に基づく美しさ、後者は覚醒ポテンシャル理論に基づく美しさに当てはまるとされている。より数理的なアプローチとして、著者の一人であるYanagisawa [注 4]は情報論に基づいた感情の数値モデルを提案し、情報論的自由エネルギーを覚醒ポテンシャルの関数として用いた解析により、新奇性と複雑さがもたらす情報量の和が覚醒ポテンシャルを表すことを数学的に示している。

本研究では、上述の意識的な美を左右する、新奇性と複雑さを定式化することを目的とする。さらに、定式化した新奇性と複雑

さを独立に操作可能な形状生成システムを開発し、このシステムが意識的な美を制御できることを確かめる。これにより、設計解の外挿に耐え、万人にとっての新奇性と複雑さを表現するシステムの実現が期待される。

## 2. 新奇性と複雑さに基づく形状生成システム

### 2.1 新奇性と複雑さの定式化

本研究では課題を単純化するため、2次元の閉曲線シルエット形状における新奇性と複雑さを定式化した。

まず複雑さは、曲率エントロピー[注 5]により定式化した。これは、曲線の長さを引数とする曲率関数から、情報エントロピーを計算する方法である。情報エントロピーは、形状の巨視的な複雑さの定式化に用いられ、形状認識の研究にも応用されている。

次に新奇性は、FPCD(フーリエ主成分距離)と呼ぶ本研究独自の指標により定式化した。これは、その形状が基準形状からどれだけ離れているかを、形状の大域的な特徴に着目して定式化したものである。定式化に際しては、大域的な特徴の表現に長けている楕円フーリエ記述子[注 6]を援用した。

### 2.2 新奇性と複雑さを独立操作可能な形状生成システム

2.1節で定式化した新奇性と複雑さを用い、これらの値を独立に制御して多様な形状を生成するシステム(Hybrid-GAN)(図1)を開発した。開発システムは生成器、特徴計算、最適化の3つの要素で構成されたループである。

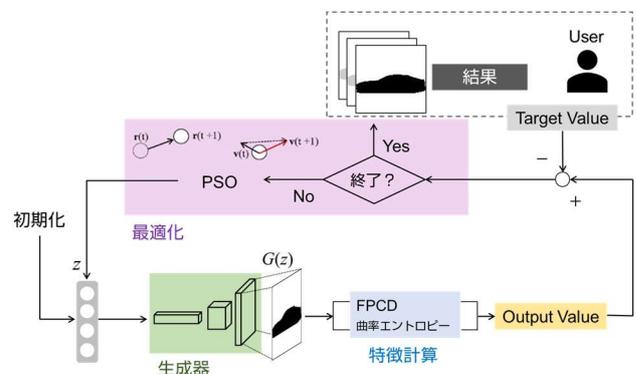


図1 新奇性と複雑さを独立操作可能な形状生成システム (Hybrid-GAN)の全体像

基準	曲率エン트로ピー	FPCD					
		2	5	8	11	14	17
蝶	0.18						
	0.20						
	0.22						
	0.24						
	0.26						
	0.28						×

図2 提案システムが生成した形状の例

次に、開発システムにおける計算の流れを説明する。まず乱数  $z$  を生成器を通して画像  $G(z)$  を生成し、その曲率エン트로ピーと FPCD を計算する。求めた値と、目標値との差を損失関数とし、これが最小となるように乱数  $z$  を更新し、最適化を図る。そして更新した  $z$  を生成器に通し、同じ過程を繰り返す。この繰り返しにより、最終的に所望の新奇性と複雑さをもつ形状が生成される。

さらに、同じ曲率エン트로ピーと FPCD に対して多様な形状を生成するために、乱数  $z$  の取れる範囲を分割し、範囲ごとに最適化した結果を提示している。

開発システムの生成器には、深層生成モデルである GAN の一種で、高画質な画像の生成に長ける PGGAN [注7]を用いた。また最適化には、連続変数の最適化手法として広く利用される PSO [注8]を用いた。

### 3 形状生成システムの有効性検証実験(1)

開発システムが生成した蝶の画像 (図2), および自動車の画像を用いて、サンプルの新奇性と複雑さ、および美しさと面白さを取得する実験(1) (参加者 24 名) を行った。ここで面白さとは、「興味深さ」を意味する。主観評価は、サンプルを印刷したカードを 9 段階に並び替えて行われ、参加者にはよく考えて回答するよう指示を行った。この実験により、定式化した新奇性と複雑さの妥当性を検証し、新奇性や複雑さが美しさと面白さの評価に与える影響を調べた。

実験と解析の結果、新奇性と FPCD、複雑さと曲率エン트로ピーの間でそれぞれ有意な正の相関が確認され、2.1 で採用した定式化の妥当性が示された。また、新奇性と複雑さの和と面白さの間で強い正の相関が確認された。

### 4 形状生成システムの有効性検証実験(2)

実験(1)で新奇性と複雑さの和と相関のあった面白さは、意識的な美の一要素とされている。しかし、実験(1)の結果だけでは面白さの評価が、PIA モデルで主張される「意識的な過程」と「無意識的な過程」のどちらで下されたのか分からない。したがって、実験(1)で意識的な美を取得できていたことを確かめる実験(2)を、実験(1)の前に同じ参加者に対して行っていた。方法は、主観評価を下せる時間を実験(1)に比べて短くし、サンプルが美的に「好き」か「嫌い」かを 1 秒前後で回答させた。

実験(2)の結果から、サンプル群を評価の低いもの(Disliked)、高いもの(Liked)に分類し、各群における美しさと面白さ(実験(1)での評価)を縦軸にとったヒストグラムを、図3に示す。図3の通り、自動車において Disliked のサンプルは、Liked のサンプルよりも美しさと面白さが有意に高いという非自明な結果を得た。

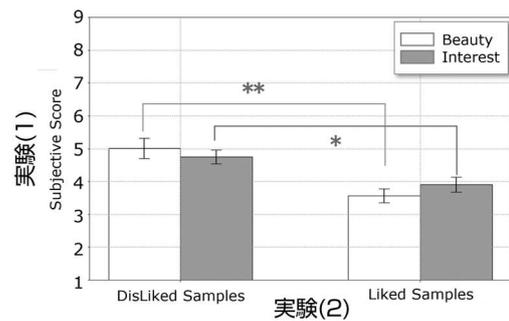


図3 形状サンプル群ごとの美しさと面白さの評価

PIA モデルでは、評価に下せる時間が長いと意識的な過程で評価されやすく、評価に下せる時間が短いと無意識的な過程で評価されやすいとされる。また、表1に示すように、無意識的な過程で低く評価されたものは、意識的な過程では高く評価されることがある。よってこの結果は、実験(1)では意識的な美が、実験(2)では無意識的な美が取得できていた証拠として説明できる。

表1 官能評価とPIAモデルの対応関係

階層	実験(1)	実験(2)
	意識的な過程	無意識的な過程
官能評価 (PIA モデルでの解釈)	面白い/混乱	嫌い
	退屈	好き

以上から、開発システムは形状の新奇性と複雑さを制御し、意識的な過程を伴う美を制御できることが示された。

### 5 結論

本研究では、新奇性と複雑さを定式化し、形状生成システムに応用した。実験では定式化の妥当性を確かめ、評価にかけられる時間を操作することで、無意識的な過程と意識的な過程を伴う主観評価を別々に取得できることを示した。加えて新奇性と複雑さにより、意識的な美を制御できることを示した。研究成果には、提案システムを利用した設計支援が期待される。

本研究は JSPS 科研費 21H03528 の支援を受けたものである。本研究で行った実験は東京大学大学院工学系研究科研究倫理委員会の承認 (承認番号: KE21-94)のもとに行われており、全ての被験者からインフォームドコンセントを得ている。

### 参考文献

- [1] Berlyne, D. E. (1971). New York, NY: Appleton-Century-Crofts
- [2] Reber, R., Schwarz, N., & Winkielman, P. (2004). *Pers. Soc. Psychol. Rev.*, 8, 364-382. doi:10.1207/s15327957pspr0804\_3
- [3] Graf, L. K. M., & Landwehr, J. R. (2015). *Pers. Soc. Psychol. Rev.*, 19
- [4] Yanagisawa, H. (2021). *Front. Comput. Neurosci.*, 19. doi:10.3389/FNCOM.2021.698252
- [5] 氏家良樹, 松岡由幸, デザイン学研究, 54(6), pp.91-100, 2008. doi:10.11247/jssdj.54.91
- [6] Kuhl, F. P., & Giardina, C. R. (1982). *Comput. Gr. Image Process.*, 18(3), 236-258. doi:10.1016/0146-664X(82)90034-X
- [7] Karras, T., Aila, T., Laine, S., & Lehtinen, J. (2018). *ICLR 2018*, 1-26.
- [8] Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995), *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, pp. 1942-1945