

# 閉曲線形状における「美的好み」の推定方法

## Method to Estimate Aesthetic Preference in Closed Planar Curves

○伊藤 武将 (慶應義塾大学大学院) \*1      岡野 晃大 (慶應義塾大学大学院) \*1      加藤 健郎 (慶應義塾大学) \*2

\*1 School of Integrated Design Engineering, Keio University

\*2 Department of Mechanical Engineering, Keio University

3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

E-mail: kato@mech.keio.ac.jp

キーワード: 美的好み, 自由エネルギー原理, 閉曲線形状

### 1. 緒 言

近年, AI 技術の発展に伴い, 美学の中でも計算機を応用してヒトと同様の美的評価を行うことを目指す計算美学の分野が注目されている. 同分野においては, 「複雑さ」や「秩序」が「美的好み」や「快」などに影響を与える可能性が示唆されている<sup>(1)</sup>. Berlyne は, 形状に対する感性評価において, 形状の「複雑さ」や「新奇性」などの覚醒度を上昇させる要因を覚醒ポテンシャルと定義し, 覚醒ポテンシャルと「快」の間に逆 U 字の関係が成り立つと主張しており<sup>(2)</sup>, 多くの研究においてその適用可能性が示唆されている.

先行研究において, 形状の「複雑さ」や「秩序」の指標は提案されているものの, これらの指標の組み合わせにより閉曲線形状における「美的好み」を精度よく推定することはできていない<sup>(3)</sup>. このため, 「美的好み」の推定において「複雑さ」や「秩序」以外の要因系を考慮する必要性が示唆されている.

「美的好み」に関する他の要因として, ヒトが無意識的に定める対象物への予測の誤差や理解度である「新奇性」や「意味理解」が挙げられる<sup>(4)-(5)</sup>. 例えば, Burns が提案した EVE' 理論においては, 「美的好み」の要因として, 「典型性にあたる期待 (Expectation)  $E$ 」, 「期待からの逸脱 (Violation)  $V$ 」, および「逸脱のうち意味を説明可能な部分 (Explanation)  $E'$ 」を定義し,  $E$  と  $E'$  を用いて「美的好み  $X$ 」を推定している. すなわち, 「美的好み」の推定において, 「複雑さ」などの対象物自体が持つ幾何学情報の評価に加えて, 対象物提示前にヒトが無意識的に設定している認知予測とそれに対する対象物提示後の認知結果との差異や変化の評価も必要であることが示唆されている. 後者において, 無意識論的推論を情報理論・ベイズ推論により定式化した, 自由エネルギー原理<sup>(6)(7)</sup>という知覚認知の研究が注目されている. そこで, 本研究では, ヒトの認知における理解度(「意味理解」)に注目し, EVE' 理論と自由エネルギー原理の両方を用い, 閉曲線形状における「美的好み」の精度よい推定方法を比較・検討することを目的とする.

### 2. 自由エネルギー原理の応用可能性

自由エネルギー原理とは, Friston が提案した知覚と行動と

学習の統一原理である. 同原理において, ヒトは感覚入力  $Y$  とこれまでの経験から得られた生成モデル  $p(Z, Y)$  に基づき, 外界の視覚対象  $Z$  を推定するとしている. 例えば, ある感覚入力 ( $Y=y_1$ ) があつた場合, 理論上, ベイズの方式を用いて  $Z$  の確率分布  $p(Z|y_1)$  (事後分布) を算出することができるものの, 現実的に算出は困難なため,  $p(Z|y_1)$  に近似する確率分布として  $q(Z)$  を定義し, それらの分布の非類似度 (Kullback-Leibler 情報量  $D_{KL}$ ) が 0 となるように変分推定を行う.  $q(Z)$  と  $p(Z|y_1)$  の  $D_{KL}$  は次式のように表せる.

$$D_{KL}[q(Z)||p(Z|y_1)] = \sum_Z q(Z) \ln \frac{q(Z)}{p(Z|y_1)} + \ln p(y_1) \quad (1)$$

同原理では式 (1) における右辺第 1 項を自由エネルギー  $F$  と定義している.  $D_{KL}$  が 0 となることで  $Z$  の推定が完了し,  $q(Z)$  と  $p(Z|y_1)$  が一致する. このとき知覚が完了し, 式 (1) は次式のように変形される.

$$F = D_{KL}[p(Z|y_1)||p(Z)] + (-\sum_Z p(Z|y_1) \ln p(y_1|Z)) \quad (2)$$

なお,  $p(Z)$ ,  $p(y_1|Z)$  は両方ともヒトがこれまでの経験から事前に得ているもので, それぞれ,  $p(Z)$  は  $Z$  の確率分布 (事前分布),  $p(y_1|Z)$  は  $Z$  と  $Y$  を結びつける観測モデル (尤度関数) である. すなわち, 式 (2) の右辺第 1 項は感覚入力の前後における  $Z$  の確率分布の差を表し, 「新奇性」にあたると思われる. 一方で, 右辺第 2 項は尤度関数と事後分布から算出されるものであり, 知覚の不確実性を表し, 「複雑さ」にあたると思われる<sup>(8)</sup>. ここでは, 尤度関数と事後分布が一致すると仮定し, 右辺第 2 項をエントロピーと捉える. 不確実性が高いということはエントロピーが高いということであり, 「複雑さ」の指標として曲率エントロピーが提案されていることを考慮し, 本研究では右辺第 2 項に曲率エントロピーが対応すると考えた.

以上より, 本研究では, 式 (2) を用いて自由エネルギーを算出し, 自由エネルギーと「美的好み」の関係を明らかにすることとした.

### 3. 「美的好み」の推定方法

まず、式 (2) の右辺第 2 項にあたる曲率エントロピー  $H$  について以下に述べる。

曲率エントロピーは閉曲線形状における「複雑さ」の指標であり、閉曲線形状の曲率を標本化、量子化することにより、次式で算出される。

$$H = -\frac{1}{\log_2 V_c} \sum_{i=1}^{V_c} \sum_{j=1}^{V_c} p_i p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad (3)$$

ここで、 $p_i$  と  $p_{ij}$  は、それぞれ曲率の生起確率および遷移確率であり、 $V_c$  は量子化された曲率の状態数を表す。このようにして算出した  $H$  を用いて  $F$  を算出する。

一方、右辺第 1 項は前章で述べたように事後分布と事前分布の確率分布の非類似度を表しているものの、事前分布を算出することは現実的には困難である。それは、式 (2) においてすべての可能性のある事象  $Z$  を考慮する必要があり、計算量が膨大になってしまうことや、事象  $Z$  が無限大であるということが生じてしまうためである。本研究では、事象  $Z$  はどれほどか定かではないため、事前分布を全事象の確率の合計が 1 となるようにし、事象数を十分に大きい値とし、かつすべての事象において確率を等しくした。事後分布に関しては、実験により得られた確信度（確率）に基づき、事前分布と事象数を等しくすることにより定めた。

次に「意味理解」を包含した「美的好み」の推定方法について以下に述べる。

第 1 章で触れた EVE 理論の応用例の 1 つに抽象絵画の分析した事例がある。この事例では、 $V$  を黒い線で囲まれた四角形の数と面積を用いて算出した情報エントロピー  $H_i$  とし、それに  $-1$  を乗じた値を  $E$  としている。 $E$  に関しては  $V$  の中で意味を理解し説明できる部分の割合  $p$  を定義し、 $V$  に乗じて次式のように  $X$  を推定している。

$$X = g(-H_i) + g(pH_i) \quad (4)$$

なお、 $g$ 、 $g'$  は比例定数である。式 (4) を参考にして、本研究では情報エントロピー  $H_i$  の代わりに曲率エントロピー  $H$ 、 $p$  は官能評価実験において得られる評価値として用いて、「意味理解」に基づく「美的好み  $X$ 」を次式のように算出する。

$$X = g(-H) + g(pH) \quad (5)$$

## 4. 官能評価実験

### 4.1. 「美的好み」と「意味理解」に関する実験

#### 4.1.1. 実験方法

- 実験に関する条件や手順を以下に示す。
- 1) 被験者：20 歳代の男女 40 名とした。
  - 2) 提示試料：3 次 Bézier 曲線を用いて、接続点数を 4 点、8 点、12 点の 3 パターンとし、接続点、制御点をランダムに移動させて生成した閉曲線形状（シルエット）を 15 個ずつ、計 45 個とした（図 1）。
  - 3) 提示方法：Web アンケート（Google フォーム）を使用し、変曲点数が 4 点、8 点、12 点の形状からそれぞれランダムに 5 個ずつ選出して同時に 15 個ずつ提示した。15 個の形状に対して官能評価をしてもらうことを 3 回繰り返して、45 個の全形状に対する官能評価値を得た。提示する

15 個の形状の組み合わせは被験者によって変わらないようにした。

- 4) 評価方法：「美的好み」、「複雑さ」を 5 段階、各形状からの連想（「意味理解」）を 3 段階のリッカート尺度をそれぞれ用いて官能評価値を得た。意味を連想できた場合、その意味の回答も求めた。

#### 4.1.2. 実験結果および考察

結果および考察を以下に述べる。

「複雑さ」と  $H$ 、「美的好み」と  $X$  との間に強い相関関係がそれぞれ確認された（「複雑さ」と  $H$  の対数近似における決定係数  $R^2 = 0.89$ 、「美的好み」と  $X$  の線形近似における決定係数  $R^2 = 0.59$ （図 2））。なお、 $H$  のパラメータおよび  $X$  の比例定数は 3 分割交差検証<sup>(6)</sup>により定めた。また、黒塗りのプロットは「意味理解」の官能評価値が高めの形状、白抜きのプロットは「意味理解」の官能評価値が低めの形状を表す。このことから「意味理解」の官能評価値が高めの方が「美的好み」は高く評価される傾向にあるということがわかる。

### 4.2. 「美的好み」と自由エネルギーに関する実験

#### 4.2.1. 実験方法

- 実験に関する条件や手順を以下に示す。
- 1) 被験者：20 歳代の男女 8 名とした。
  - 2) 提示試料：上の実験で用いた形状のうち、得られた実験結果を元に選別した 15 個とした。
  - 3) 提示方法：Web アンケート（Google フォーム）を使用し一度に 15 個提示した。
  - 4) 評価方法：「美的好み」を 5 段階のリッカート尺度を用いて官能評価値を得た。加えて、各形状からの連想（「意味

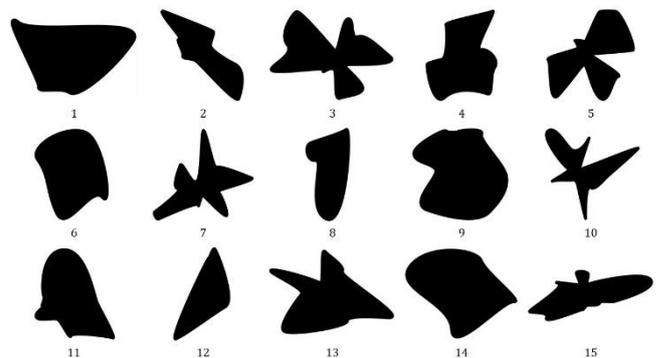


Fig.1 Sample shapes

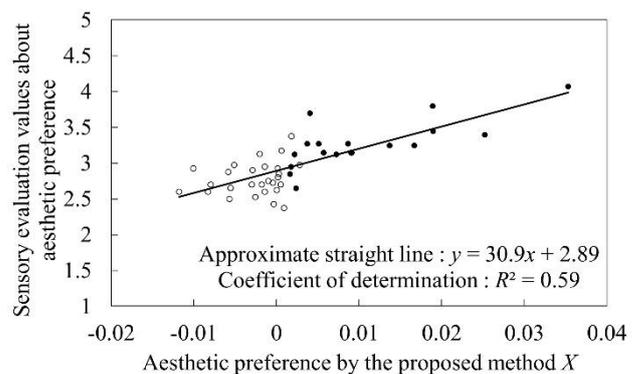


Fig.2 Relationship between  $X$  and aesthetic preference in sample shapes

理解)を連想した意味とその確信度(%)で回答を得た。

なお、意味は連想できたものはすべて回答するように求めた。(回答例:木60%, ブロccoli20%, カリフラワー20%)

#### 4.2.2. 実験結果および考察 結果および考察を以下に述べる。

まず、式(2)の右辺第1項を算出するにあたり、予測する事象数は1000000とした。なお、回答を求める際に確信度を合計で100%にしなければならないという条件は設けなかったため、 $F$ を算出するに当たっては、合計が100%となるように工夫した。次に、式(2)において $F$ を算出して「美的好み」との関係を見た(図3)。結果、線形近似における決定係数が $R^2 = 0.54$ と強い相関関係を確認した。このことから、 $F$ が大きいほど、「美的好み」は高く評価されるということがわかる。

#### 4.3. 両実験の比較

両実験結果における比較、考察を以下に述べる。なお、以下では「美的好み」と「意味理解」に関する実験(4.1節)を実験1、「美的好み」と自由エネルギーに関する実験(4.2節)を実験2と表記する。

上述したように、「美的好み」の官能評価値と各推定方法による算出値との関係において、線形近似における決定係数は、 $X$ に関しては $R^2 = 0.59$ 、 $F$ に関しては $R^2 = 0.54$ となり、どちらも「美的好み」との相関関係が確認された。 $F$ の $R^2$ が小さくなった原因については、事象数による影響が考えられる。 $F$ を実際に算出しようとするれば、可能性のある事象 $Z$ のすべてを考慮しなければならない。しかし、本研究では困難であるため、事象数は十分に大きい値として1000000を採用した。この値を大きく(小さく)すると決定係数が高く(低く)なるような傾向があるため、今後検討する必要がある。

そして、図2、図3を比較すると、両図に共通して、近似直線から逸脱した形状が確認できた。これらの形状はどちらの実験においても同じ形状であり、「美的好み」が高めに評価された形状(図1における10の形状)の意味は、ハチドリや妖精などであり、「美的好み」が低めに評価された形状(図1における8の形状)の意味は、食虫植物やキノコなどであった。このことから、「美的好み」は連想した意味による影響も考慮する必要があると考えられる。

さらに、両図を比較すると、「美的好み」の官能評価値が大きく変化していた形状が確認された。これらの形状はどれも実験1よりも実験2の方が官能評価値は高くなっていった。この原因として実験条件による影響が考えられる。上述したように実験1では形状から意味を連想できたかどうかを3段階で評価してもらい、連想できた場合はその意味も回答してもらおうという形式であるのに対し、実験2では連想した意味とその確信度(%)を意味の個数は問わずに回答してもらおうという形式とした。前者は1つの形状に対して1つの意味を連想していたが、後者は1つの形状に対して複数の意味を連想するため、連想した意味の中で好ましい意味があれば、「美的好み」は高めに評価されると考えられる。

## 5. 結 言

本研究では、閉曲線形状において、「意味理解」を包含した「美的好み」の推定方法を提案した。そして、「意味理解」と「美的好み」の関係を明らかにした。加えて、知覚認知の研

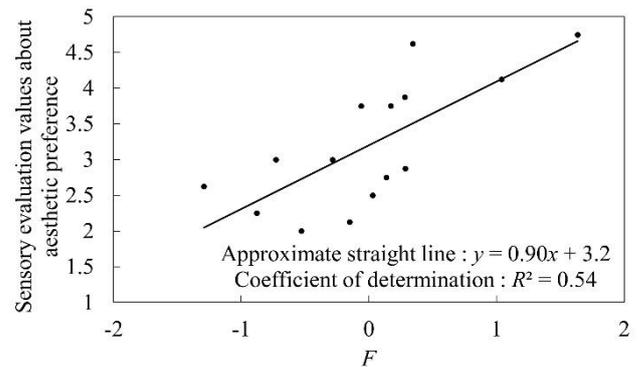


Fig.3 Relationship between  $F$  and aesthetic preference in sample shapes

究である自由エネルギー原理を用いて、自由エネルギーと「美的好み」の関係を明らかにした。本研究ではランダムに作成した閉曲線形状を用いた官能評価実験を行ったが、今後は製品を閉曲線形状で再現して用いるなど、他の事例に適用して有効性の検証を行う予定である。

## 文 献

- (1) Birkhoff, G. D.: Aesthetic Measure, Harvard University Press, 1933.
- (2) Berlyne, D. E.: Aesthetic and Psychobiology, Appleton Century Crofts, 1971.
- (3) Kato, T., Matsumoto, T.: Morphological Evaluation of Closed Planar Curves and Its Application to Aesthetic Evaluation, Graphical Models, Vol. 109, 2020.
- (4) Burns, K.: Atoms of EVE': A Bayesian Basis for Esthetic Analysis of Style in Sketching, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol. 20, 185-199, 2006.
- (5) Burns, K.: Entropy and Optimality in Abstract Art: An Empirical Test of Visual Aesthetics, Journal of Mathematics and the Arts, Vol. 9, 77-90, 2015.
- (6) Friston, K. J.: A Theory of Cortical Responses, Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences, Vol. 360, No. 1456, 815-836, 2005.
- (7) Friston, K. J.: The Free-energy Principle: A Unified Brain Theory?, Nature Reviews Neuroscience, Vol. 11, No.2, 127-138, 2010.
- (8) Matheny, M. E.: Effects of SVM Parameter Optimization on Discrimination and Calibration for Postprocedural PCI mortality, Journal of Biomedical Informatics, Vol. 40, No. 6, 688-697, 2007.
- (9) Yanagisawa, H.: Information-Theoretic Free Energy as Emotion Potential: Emotional Valence as a Function of Complexity and Novelty, Neurons and Cognition, ,2020