

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03375

研究課題名（和文）ベイズ最適化による未知の多次元心理物理関数の推定手法の構築と応用分野の開拓

研究課題名（英文）Bayesian Optimization for Estimation of Unknown Multidimensional Psychophysical Functions

研究代表者

小森 政嗣（Komori, Masashi）

大阪電気通信大学・情報通信工学部・教授

研究者番号：60352019

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多次元の心理物理関数（本論文では効用関数と呼ぶ）をガウス過程回帰により推定するための方法論の構築を試みた。本研究では、二肢選択判断に対する回答に基づいて効用関数を推定するために、ガウス過程回帰を拡張したガウス過程選好学習（Gaussian process preference learning: GPPL）に着目した。さらに、ガウス過程回帰を顔の評価やデザイン研究など多様な心理学的問題に適用するための様々な方法論を開発し、その有効性を示した。また、これらの実験を行うためのアプリケーションを開発し、本手法の応用分野の開拓を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義は（1）ガウス過程選好学習（GPPL）が多様な心理学的な問題に適用可能であり、また多次元の心的な効用関数の推定において従来の手法より高い予測精度を持つことを示したこと、（2）また効用関数の特徴や信頼性を記述するための様々な手法を確立したことである。社会的意義は、GPPLにもとづくベイズ最適化を簡便に行うことができるアプリケーション・実験システムを構築し、この手法が、言語化が容易ではない感性の可視化（他者に対する偏見の可視化、商品コンセプトの可視化）に有効であることを示したことである。

研究成果の概要（英文）：In this project, we developed methodologies for estimating a multidimensional psychophysical function (referred to as a utility function) using Gaussian process regression. We employed Gaussian process preference learning (GPPL), an extension of Gaussian process regression, to estimate human utility functions based on responses to alternative two-choice tasks. Furthermore, we developed various methodologies to apply Gaussian process preference learning to various psychological problems such as facial impression researches and design researches, and demonstrated the effectiveness of the proposed method through experimental investigations. We also developed applications for conducting these experiments and explored the field of application of the methodologies.

研究分野：実験心理学

キーワード：ガウス過程選好学習 ガウス過程回帰 効用関数 顔知覚

1. 研究開始当初の背景

例えば、顔の魅力は、様々な顔のパーツの配置や、髪型、顔の色、テクスチャ、視線方向など多くの要因によって決定される。このような複雑な知覚・判断の多くは多次元の刺激の組み合わせによって生じるため、多次元の物理的な刺激を扱うことができる心理物理学的な測定法が必要となる。しかし、一般的には多次元の物理量と心理量の関数関係を検討することは容易ではない。仮に総当たりの(グリッドサーチと呼ばれる)に全ての物理量の組み合わせに対する応答結果を収集する場合、物理量が多変量の場合コスト的にも時間的にも不可能である。また、比較的少ない試行回数で複数の特徴次元を持つ刺激に対する選好を検討する最も一般的な手法の一つはコンジョイント分析を心理学的な検討に適用することも問題がある。問題の一つは、各属性における水準をあまり多くはできないため、連続的な特徴の違いに対する応答の変化を検討することが難しい点である。また物理的な特徴の組み合わせによる効果を検討するために高次の交互作用項を考慮したモデルを採用する必要があるが、それでは試行回数が大幅に増えてしまうためコンジョイント分析を採用するメリットは失われてしまう。さらに、心理物理関数は多くの場合未知、すなわちブラックボックス関数であり、またアприオリに関数形について仮定を置くことにも慎重にならなければならないため、単純な線形回帰モデルによる検討は難しい。

そこで、本研究ではガウス過程回帰(Gaussian Process Regression)を多次元の心理物理学的な問題に適用しようと考えた。ガウス過程回帰とは、未知の関数(ブラックボックス関数)の関数の形を推定する手法の一つである。ガウス過程回帰は、線形回帰分析と異なり多峰性の関数など非線形関数の推定を行うことができるという利点があり、さらにベイズ推定の特性から過学習が生じにくいという特徴を持っているとされる。またベイズ推定に基礎を置くため、推定値だけでなくその信頼性についても検討できることも利点である。そのため材料工学やケモメトリックスでのプロセスの最適化、機械学習におけるハイパーパラメータ探索など様々な分野でガウス過程回帰分析は応用されてきた。

このようなガウス過程の特長にもかかわらず、心理学的な問題にガウス過程回帰が適用されることはこれまで殆どなかった。それは、一般的なガウス過程回帰では学習セットに含まれる応答が連続量であることを前提としているためである。人間による応答は、仮に数値による評価であったとしても、リッカート尺度に対する回答のように離散的な値を取るため、応答に対してそのままガウス過程回帰を適用することは難しい。また、数値による評価を繰り返し行わせた際に、評価値の平均や分散が時間とともに変化してしまうこともガウス過程回帰を適用する上で問題となる。

2. 研究の目的

人間の判断・評価のような離散的な応答をもとにガウス過程回帰により心理物理関数(ここでは効用関数と呼ぶ)を推定するには2つのアプローチがある。一つはリッカート尺度のような順序尺度の応答をもとにガウス過程回帰を行うガウス過程順序回帰(Gaussian process ordinal regression: GPOR)と呼ばれる方法により効用関数を推定する手法である。GPORは多項プロビットモデルとガウス過程回帰を組み合わせた手法である。もう一つのアプローチは、二肢選択判断に対する回答に基づいてガウス過程回帰を行うガウス過程選好学習(Gaussian process preference learning: GPPL)を用いることである。これは、一対比較法におけるThurstoneモデルと同様の仮定を判断のプロセスにおいて仮定することにより、二肢選択判断に対する回答に基づいて未知の関数の推定を行うことができるようにした手法である。

本研究では、人を対象とした研究において、GPORおよびGPPLが未知の効用関数の推定において既存の手法より優れた予測精度を持つかどうかを検討することを目的とした。また、ガウス過程回帰は一般的にベイズ最適化(Bayesian Optimization)と呼ばれる逐次実験計画手法において用いられる。ベイズ最適化はガウス過程回帰における探索点を、獲得関数と呼ばれる関数を利用することで逐次的に決定する非常に強力な最適化手法として知られている。本研究では、GPPLおよびGPORと獲得関数方略を組み合わせることで、逐次実験計画が心理学的問題の解明に適用可能かについても検討を行った。

3. 研究の方法

本プロジェクトでは、まず初期の段階においてGPORによる心理実験システムの構築および顔画像、無意味図形、および配色に関する感性評価実験を行いその有効性について検討を行っている。しかし、これらの検討の結果、GPORは時間に伴う実験参加者の判断基準の変化に弱く、多くの試行が必要となる多次元の効用関数の解明には不向きであることが判明したため、その後の検討は主にGPPLに関する検討を中心に行った。

GPPLに関する検討は主に、下の3つの観点を中心に行った。

(1) 心理学的な課題における予測精度・汎化性能の検討および、頑健な知見を提供するために必要とされる試行回数を検討する手法の構築

(2) ベイズ最適化を逐次的に行うことができる心理学的実験用アプリケーションと実験システムの構築

(3) 本研究の分析手法の特長を発揮することができる新しい心理学的な課題の開拓と実験手法の構築

4. 研究成果

上記「目的」の番号に沿って研究成果を述べる。

(1) 予測性能の検討

顔画像の魅力を判断させる課題を行わせる実験を実施し、GPPL が効用関数の推定において有効な手法かどうか検討した。実験刺激には 8 次元の特徴量に基づき StyleGAN2 により生成された画像を用いた。予測精度・汎化性能を定量的に評価するために、k-分割交差検証により学習曲線と検証曲線の検討を行った結果、高い精度で実験参加者の判断を予測できることが示され、比較対象とした線形回帰モデルを上回っていた。このことから、GPPL は人の複雑な刺激に対する効用関数を推定する上で有効な手法であると考えられた。

(2) 心理学的実験用アプリケーションと実験システムの構築

多次元の物理的な特徴を持つ刺激を用いる二肢選択課題を行うためのアプリケーションの開発を行った。これらのアプリケーションは、リアルタイムで実験参加者の反応履歴を処理し、獲得関数により次に提示する刺激を作成する逐次実験計画に対応したものである。

本研究の期間はコロナ禍のために実験室での実験が困難であったため、ウェブブラウザ上でこれらの実験を行うことができるウェブサービスの構築も併せて行った。これらのアプリケーションの一部は Github 上ですでに公開している。

(3) 本手法の特長を利用した新しい実験手法の構築と心理学的な課題の開拓

複雑な物理的な刺激について瞬時に評価・判断が行われる事例は、本研究で提案する手法を適用する上で最も適していると考えられる。そこで、本計画では、このような事例として、顔に対する評価や印象の判断、プロダクトデザイン、料理、音色などを取り上げて本手法の有用性について検討を行った。ここでは顔及びプロダクトデザイン、料理に関する検討事例を述べる。

・顔刺激に対する印象評価

深層学習ベースの画像生成モデルである StyleGAN2 の潜在表現を特徴量として用いて顔に対する評価の検討を行った。ここでは StyleGAN2 の潜在表現を説明変数とし、魅力評価を目的変数としたガウス過程回帰を行っている。StyleGAN2 を用いることで、顔に関する従来の心理学的研究で問題となっていた、実在の人物の顔画像を用いることによる倫理的問題と、不自然な顔画像に伴う生態学的妥当性の問題の両方の解決することも可能である。下に示したのは、顔特長と性格特性との関連を判断させる課題を行った実験から得られた効用関数をすべての実験参加者で平均し最大値、最小値などを求め、それにもとづいて顔画像を再合成した結果である(図 1)。平均効用関数から求められた支配性と関連する顔特徴は性的二型と関連していた。この結果は、この手法が妥当なものであったことを示唆するとともに、GPPL が多様で複雑な印象評価課題に適用可能であることを示している。また、判断の個人差を KL-ダイバージェンスにより評価する手法や、平均効用関数の信頼性について評価するための方法の構築も行った。

・商品コンセプトに合致するプロダクトデザインの作成

シャンパーボトル容器の輪郭形状を取り上げ、商品コンセプトに合致した容器形状デザインの生成を試みた。容器形状は、楕円フーリエ解析により求めたフーリエ係数を主成分分析の結果から 3 次元の変数で表現されている。容器形状の画像対を調査参加者に提示した上で「どちらが商品コンセプトに適合しているか」を判断させる課題を行わせ、GPPL により分析を行った。その平均効用関数が最大値となる変数から構築された容器形状(図 2)は、商品コンセプトを正しく反映していることが実験結果から示された。

・塩ラーメンの調味料配合比の決定

塩ラーメンが最も美味しくなる調味料の配合比を GPPL により検討した。GPPL は二肢選択データを対象にした分析手法であるが、ここではこれを順序データの分析に拡張した。一般的なベイズ最適化で用いられる獲得関数では、次の探索点は一つしか決定することができないが、ここでは実験の効率化のため獲得関数に $qNEI(q \text{ noisy expected improvement})$ を用いて同時に複数の探索点候補の決定を行い、複数の塩ラーメンに対する美味しさの順序付けを行わせた。結果から塩ラーメンの最適な調味料配合比を決定した。

以上の検討から本研究計画の成果は以下にまとめられる；(1) ガウス過程選好学習 (GPPL) が多次元の心理物理関数の推定において従来の手法より高い予測精度を持つことを示したこと、(2) GPPL にもとづくベイズ最適化を簡便に行うことができるアプリケーション・実験システムを構築したこと、(3) GPPL が多様な心理学的な問題に適用可能であることを示した。また平均効用関数の特徴や信頼性を記述するための様々な手法を確立した。

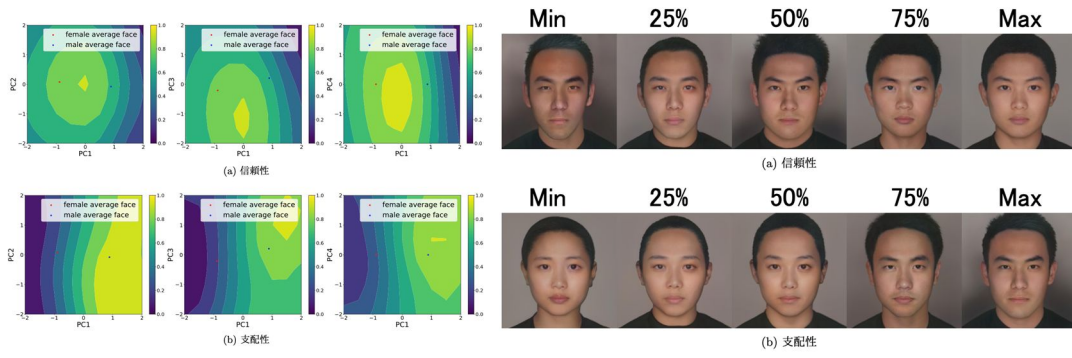


図1 顔印象の平均効用関数（左）とそれをもとに StyleGAN2 により合成された顔（右）

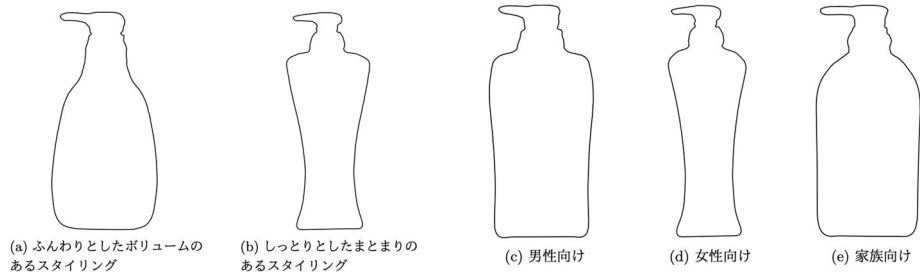


図2 商品コンセプトとの一致を判断させる課題から作成されたシャンプーボトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小森 政嗣	4. 巻 119(38)
2. 論文標題 二肢選択ベイズ最適化による「かわいい」形の探索	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告(HCS2019-15)	6. 最初と最後の頁 109 - 112
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 無
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 小森 政嗣	4. 巻 2A-045
2. 論文標題 二肢選択ベイズ最適化によるリップ・チークの色のよい組み合わせ の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本認知科学会第36回大会論文集	6. 最初と最後の頁 350-353
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 Shiroshita Keito, Komori Masashi, Nakamura Koyo, Kobayashi Maiko, Watanabe Katsumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Application of Gaussian Process Preference Learning for Visualizing Facial Features Related to Personality Traits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. the 8th IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE 2021)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CSDE53843.2021.9718431	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 Komori Masashi, Shiroshita Keito, Nakagami Masataka, Nakamura Koyo, Kobayashi Maiko, Watanabe Katsumi	4. 巻 12883
2. 論文標題 Investigation of Facial Preference Using Gaussian Process Preference Learning and Generative Image Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 193 ~ 202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-84340-3_15	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 城下 慧人、小森 政嗣、横山 卓未	4. 巻 24
2. 論文標題 二肢選好に基づく商品コンセプトに合致した容器輪郭形状の生成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ヒューマンインタフェース学会論文誌	6. 最初と最後の頁 53～62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11184/his.24.1_53	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 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 城下 慧人・小森 政嗣
2. 発表標題 生物の気持ち悪い配色の特徴
3. 学会等名 人工知能学会 (JSAI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小森 政嗣
2. 発表標題 ガウス過程回帰によるプーバ/キキ形状の生成
3. 学会等名 日本心理学会第83回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 城下慧人・小森 政嗣
2. 発表標題 ガウス過程順序回帰による輪郭形状の「かわいさ」の検討
3. 学会等名 HCGシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 城下慧人・小森 政嗣
2. 発表標題 ガウス過程順序回帰による生物の気持ち悪い配色の探索
3. 学会等名 人工知能学会全国大会（第34回）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masashi Komori, Keito Shiroshita
2. 発表標題 Synthesis of contour shapes perceived as kawaii by using Bayesian optimization
3. 学会等名 The 32nd International Congress of Psychology (ICP 2020+) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 城下慧人・木村光栄・小森政嗣
2. 発表標題 順位づけ評価に基づくベイズ最適化による塩ラーメンの調味料配合比の決定,
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小森政嗣・城下慧人・中村航洋・小林麻衣子・渡邊克巳
2. 発表標題 ガウス過程選好学習と敵対的生成ネットワークを用いた外集団の顔特徴の可視化ー阪神ファンが考える巨人ファンの顔ー
3. 学会等名 日本心理学会第85回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小森政嗣・城下慧人・中村航洋・小林麻衣子・渡邊克巳
2. 発表標題 二肢選択課題にもとづくガウス過程選好学習による外集団の顔のステレオタイプの推定
3. 学会等名 HCGシンポジウム2021
4. 発表年 2021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	遠里 由佳子 (Tohsato Yukako) (80346171)	立命館大学・情報理工学部・教授 (34315)	

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