

招待論文 自然言語を介した協調的デザイン最適化[¶]丹羽 遼吾^{*†} 吉田 成朗^{*} 小山 裕己^{‡§} 牛久 祥孝^{*}

概要. 効果的なインタラクション設計には、最適なパラメタの特定が必要である。そのためデザイナーは反復的なユーザテストや試行錯誤を行うが、このプロセスは多次元空間における複数の目的のバランスを取る必要がある、時間と認知的負荷を要する。他方、ベイズ最適化等に基づくシステム主導型手法は、次に試すべきパラメタを提示できるが、デザイナーが最適化に介入できる機会は限られ、体験を損なう恐れがある。本研究では、自然言語を通じてデザイナーと最適化システムの協調を可能にするデザイン最適化フレームワークを提案する。システム主導型最適化と大規模言語モデルを統合し、デザイナーが最適化プロセスへ介入しつつ、システムの推論理解を可能にする。実験結果から、提案手法はシステム主導型よりユーザの行為主体感が高く、手動設計に比べて有望な最適化性能を示した。さらに既存の協調型手法と遜色ない性能を発揮しつつ、認知的負荷を低減することが示された。

1 はじめに

優れたインタラクションを設計するためには、デザイナーが設計パラメタを探索し、最適な組み合わせを特定する必要がある。しかし、パラメタ空間が高次元である場合、手動での探索は困難であり、各パラメタ間の関係やそれがパフォーマンスに与える影響を同時に考慮する必要がある。さらに、速度や正確性といった複数の目的を同時に最適化する必要があり、多くの反復的なユーザテストを要するため、時間的・認知的コストが高い [2, 5, 1, 10]。これらの課題に対処するため、**human-in-the-loop 最適化**が提案されており、特に**ベイズ最適化 (Bayesian Optimization; BO)** [8] を用いた設計探索が広く利用されている。BO では、システムが次に評価すべきパラメタを自動的に決定することで、デザイナーの判断に比べ合理的かつ効率的な探索が可能となる。

しかし、完全にシステム主導の最適化はデザイナーの体験を損なうことが指摘されている [2]。デザイナーは問題理解や経験に基づく直感を持つが、多くのシステム主導の方法では最適化過程に介入する手段が限られている。そのため、探索を自分の意図で方向づけることが難しく、行為主体感の低下や設計問題に対する洞察を獲得する機会の損失を招く。

これらを踏まえ、**自然言語を介してデザイナーと最適化システムが協調的に対話できれば**、より柔軟な探索が可能になると考えた。これにより、デザイナーは設計空間の詳細を知らなくても意図を伝えられ、システムの提案理由も理解しやすくなる。

2 自然言語を介した協調デザイン最適化

本研究の目的は、インタラクティブシステムにおける設計パラメタ探索を、デザイナーと最適化システムが協調的に行える仕組みを構築することである。特に、UI/UX デザイナーや HCI 研究者が反復的なユーザテストを通じてシステムを洗練させるような場面を想定している [2, 4, 5, 6]。

先行研究 [6] では、デザイナーが探索空間を制約条件 (「禁止領域」や「禁止範囲」) として明示的に指定する協調的 BO 手法が提案されている。この方法はデザイナーが最適化過程を制御できるが、高次元空間における数値入力を慎重に設定する必要があり、操作負担が大きい。本研究の協調的インタラクションは、この負担を軽減するために、自然言語を介してサンプリング過程に介入できるようにし、さらにシステムが提案理由を自然言語で説明する仕組みを導入した。これにより、デザイナーは直感的な指示で最適化を誘導でき、システムの意図を理解しながら次の探索を効果的に計画できる。

図 1 は、協調的デザイン最適化の典型的なインタラクションシナリオを示している。たとえば Web デザインの場面では、デザイナーが「フォントサイズを大きくしたバリエーションを探索したい」等の指示を自然言語で与えることができ、システムは要求を反映したパラメタ提案を生成する。また、デザイナーが提案されたパラメタの根拠を知りたい場合には、システムが提供する選択理由を確認できる。たとえば、「この提案はまだ探索されていない設計空間領域で精度を最大化することに焦点を当てています」といった説明が示される。

Copyright is held by the author(s). This paper is nonrefereed and non-archival.

* オムロン サイニックス

† 筑波大学

‡ 東京大学

§ 産業技術総合研究所

[¶] 本稿は、UIST 2025 で発表した論文 “Cooperative Design Optimization through Natural Language Interaction” [7] の概要をまとめたものである。

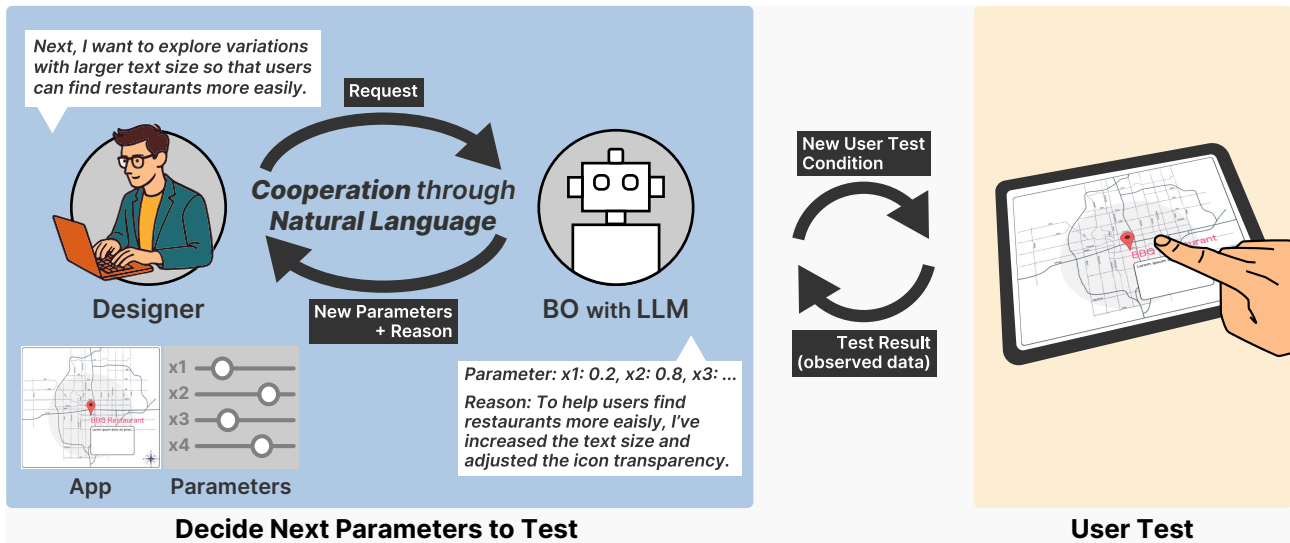


図 1. 自然言語を介した協調デザイン最適化の概念図。デザイナーはユーザテストを繰り返しながら、提案システムに自然言語で探索方針を伝え、システムから提案とその理由を受け取りつつ次の探索パラメータを決定する。

3 LLM 誘導型ベイズ最適化

本システムは、デザイナーの自然言語による指示を最適化過程に反映するため、BO に大規模言語モデル (LLM) を統合する。BO は、これまでに得られた評価データを基に次に試すべき条件を理論的に推定する手法であり、未知の設計空間における効率的な探索を可能にする。本研究では、BO の拡張手法であるバッチベイズ最適化を用いる。この方法は、各反復で候補全体として情報価値が高くなるよう複数の候補点を同時にサンプリングするため、探索の多様性を確保しつつ効率的に設計空間を探索できる。

各反復では、バッチベイズ最適化によって複数の候補パラメータをサンプリングし、これらをプロンプトとして LLM に渡す。プロンプトには、候補パラメータに加えて、最適化タスクに関する情報 (各パラメータの意味と範囲、目的指標の内容やこれまでの評価履歴など) が含まれる。LLM はこれらの情報とデザイナーの自然言語による要求を照らし合わせ、要求に整合する候補を選択する。さらに、選択理由を自然言語で生成し、デザイナーがその判断を理解・検証できるよう支援する。ユーザテストを実施することで得られる評価結果は、次の学習ステップに利用される。この反復的プロセスにより、BO の理論的な探索効率と、デザイナーの意図を反映した柔軟な探索が統合された協調的最適化が進行する。

4 ユーザスタディ

実験 1: 制御レベルの比較 実験 1 の目的は、制御レベルの違いがデザイン最適化タスクにおけるユーザ体験と最適化性能の双方に与える影響を明らかにすることである。本実験では、デザイナー主導条

件、システム主導条件、協調条件 (提案手法) の三条件を同一参加者内で比較し、最適化性能と体験を評価した。相対ハイパーボリュームによる最適化性能については Friedman 検定の結果、有意差が認められた ($p < 0.001$)。事後比較の結果、デザイナー主導とシステム主導 ($p.adj < 0.001$)、システム主導と提案手法 ($p.adj = 0.001$) の差が有意であり、デザイナー主導と提案手法の差は非有意であった ($p.adj = 0.071$)。行為主体感合成スコア ([9] をもとに作成) についても Friedman 検定を行ったところ、有意な差が認められた ($p = 0.001$)。事後比較ではデザイナー主導とシステム主導 ($p.adj = 0.002$)、システム主導と提案手法 ($p.adj = 0.002$) の差が有意であり、デザイナー主導と提案手法の差は非有意であった ($p.adj = 1.000$)。すなわち、提案手法はシステム主導型よりユーザの行為主体感が高く、最適化性能はデザイナー主導条件と比べて有意差は得られなかったが、有望な性能を示した。

実験 2: 協調方式の比較 実験 2 の目的は、提案手法と、同様に協調的最適化を目指す既存研究 [6] との違いを直接比較することであるため、GUI で禁止領域を指定する協調条件 (明示制約) [6] と、提案手法を比較した。相対ハイパーボリュームによる最適化性能について Wilcoxon の符号順位検定の結果、有意差は認められなかった ($p = 0.204$)。一方、認知負荷については、提案手法の方が有意に低かった (NASA-TLX [3] における精神的負荷 [Q1]: $p < 0.001$)。このことから、自然言語による指示がタスク遂行時の負荷軽減に寄与したことが示唆された。すなわち、既存の協調型手法と遜色ない性能を示しつつ、認知的負荷を低減することが示された。

謝辞

本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 JP-MJMS2236 の支援を受けて実施されたものです。

参考文献

- [1] X. Bi, T. Ouyang, and S. Zhai. Both complete and correct? multi-objective optimization of touchscreen keyboard. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 2297–2306, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [2] L. Chan, Y.-C. Liao, G. B. Mo, J. J. Dudley, C.-L. Cheng, P. O. Kristensson, and A. Oulasvirta. Investigating Positive and Negative Qualities of Human-in-the-Loop Optimization for Designing Interaction Techniques. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [3] S. G. Hart and L. E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock and N. Meshkati eds., *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.
- [4] Y.-C. Liao, R. Desai, A. M. Pierce, K. E. Taylor, H. Benko, T. R. Jonker, and A. Gupta. A Meta-Bayesian Approach for Rapid Online Parametric Optimization for Wrist-based Interactions. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [5] Y.-C. Liao, J. J. Dudley, G. B. Mo, C.-L. Cheng, L. Chan, A. Oulasvirta, and P. O. Kristensson. Interaction Design With Multi-Objective Bayesian Optimization. *IEEE Pervasive Computing*, 22(1):29–38, 2023.
- [6] G. Mo, J. Dudley, L. Chan, Y.-C. Liao, A. Oulasvirta, and P. O. Kristensson. Cooperative Multi-Objective Bayesian Design Optimization. *ACM Trans. Interact. Intell. Syst.*, 14(2), jun 2024.
- [7] R. Niwa, S. Yoshida, Y. Koyama, and Y. Ushiku. Cooperative Design Optimization through Natural Language Interaction. In *Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [8] B. Shahriari, K. Swersky, Z. Wang, R. P. Adams, and N. de Freitas. Taking the Human Out of the Loop: A Review of Bayesian Optimization. *Proceedings of the IEEE*, 104(1):148–175, 2016.
- [9] B. Wang, Y. Li, Z. Lv, H. Xia, Y. Xu, and R. Sodhi. LAVE: LLM-Powered Agent Assistance and Language Augmentation for Video Editing. In *Proceedings of the 29th International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '24, p. 699–714, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [10] S. Yoshida, Y. Koyama, and Y. Ushiku. Toward AI-Mediated Avatar-Based Telecommunication: Investigating Visual Impression of Switching Between User- and AI-Controlled Avatars in Video Chat. *IEEE Access*, 12:113372–113383, 2024.