

学位論文の要旨

氏名

久富 あすか

学位論文題目

階層型最適化方式とデザインへの応用に関する研究

本論文は、種類の異なる難しさを含む最適化問題を研究対象とする。近年、最適化技術は工学分野をはじめとする様々な領域で活用され、新幹線の車両形状の設計や、金融機関のリスク最小化／収益最大化などに応用されている。しかし、最適化問題の中には、制約条件が強い、かつ、解の評価基準が曖昧であるなど、求解を困難にする要因を複数含む最適化問題が存在する。

本論文は、求解を困難にする要因を複数含む最適化問題において、それらの要因を分けることで問題を階層的に表現し、それぞれの要因に対して異なる解法を適用する階層型最適化方式を提案する。本方式の特徴は、各階層が独立しているため、各要因に対応する異なる解法を用いることが可能な点である。例えば、問題の特性に依存しない大域的最適化を行うメタヒューリスティクス、問題依存の効率的な局所探索アルゴリズム、さらに、機械学習に基づく生成モデルなどを、各階層の解法として利用できる。

本論文では、上記のような最適化問題の例として、タイリング（平面充填）が可能な図形（タイル）の生成問題に着目する。本問題は、与えられた図形（目標図形）をタイルに変形する難しさ、および、図形間の類似度を定量化する難しさを含む。前者は強い制約条件であり、実行可能解を効率的に発見することが難しい。後者は解の評価基準が人間の感性に依存するため、数式のように定義することが難しい。このような求解を困難にする要因を分解し、異なる解法を併用する階層型最適化方式を提案する。具体的な手法として、タイル生成の過程における異なる2つの問題に着目し、目標図形に類似するタイルを生成する手法、および、映像をもとにキャラクタのタイルを生成する手法の2つの手法を提案する。

第1章では、本論文の研究対象について説明し、その一例であるタイル生成問題を解決する階層型最適化方式を提案する。また、本方式に類似するハイブリットアルゴリズムとの異なる点について述べる。

第2章では、関連研究について述べる。まず、タイル生成問題の定義について述べ、先行研究、および、本研究で用いる最適化や機械学習の手法について説明する。先行研究では、タイル生成問題を解析的に解く手法、および、メタヒューリスティクスを用いて解決する手法について説明する。

第3章では、階層型最適化方式を具体化した第1の手法、すなわち、与えられた目標図形に類似したタイルを生成する手法を提案する。本手法は、先行研究と同様の定式化のもとでタイル生成問題を解く。提案手法はタイル生成問題を二階層で表現し、上位最適化層にはメタヒューリスティクス、下位最適化層にはタイリングに必要な制約条件を満たす図形を解析的に導出する先行研究を用いる。実験結果より、本手法は、タイリングが可能な条件を満たしつつ、目標図形に類似するタイルを生成できることを確認した。

第4章では、階層型最適化方式を具体化した第2の手法、すなわち、タイリングに適した目標図形を生成する手法の提案を行う。本手法は、先行研究では考慮されていない新たな問題を解く手法である。タイル生成問題においては一般に、目標図形は人間により描画されることを前提としていたが、本手法は映像やCGモデルを用いてタイルに適した目標図形を生成する。本手法は三つの階層から構成されており、上位最適化層では、対象オブジェクトの画像をパラメトリックに生成するモデルを用いて、潜在変数の最適化によりタイリングに適した目標図形を生成する。中位および下位は、目標図形に類似するタイルを生成する。これにより、目標図形の描画の試行錯誤が不要となることが期待できる。実験により、本手法は、タイリングに適した目標図形を生成することを確認した。

第5章では、提案手法が多様な産業に応用可能であることを示す一つの事例として、製菓への応用を試みる。3章で提案した手法の上位最適化層に新たな制約条件を追加することで、成形の際に壊れやすい部位の発生を抑制する。実験により、製菓に適したタイリングが可能な図形が生成されることを確認した。

第6章では、提案手法の処理速度の高速化を試みる。3章および4章では、アルゴリズムの挙動の解釈の容易性、および、生成される解の多様性を考慮して単純なメタヒューリスティクスを使用して評価実験を行った。このため、より優れた収束特性を持つメタヒューリスティクスを用いて高速化を試みる。実験を行い、将来的に導入を検討している対話型最適化の実現に寄与するか検証を行い、3章で提案した手法より収束速度が向上したことを確認した。

第7章では、結論として、これまで述べた第1章から第6章を総括する。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Study on hierarchical optimization methods and their application to artistic design

Name: Hisatomi Asuka

This paper focuses on optimization problems that are difficult to solve due to multiple difficulties with different properties. Optimization is a process of finding an optimum solution in a search space of a problem. Recently, optimization has been applied to various fields, such as vehicle design of Shinkansen and simultaneous risk minimization and profit maximization of financial transactions. However, some optimization problems are difficult to solve because they involve multiple difficulties of different aspects, such as strong constraints and ambiguity on evaluation criteria.

To solve such optimization problems, this paper proposes a hierarchical optimization architecture that divides the problem's difficulties into different layers and employs different optimization methods for each layer. The advantage of our architecture is that it can employ various methods as solvers for layer, such as meta-heuristics, problem-dependent local search algorithms, machine learning-based generative models, and so on.

In particular, this paper focuses on problems of generating tileable shapes. Tiling is the act of covering the two-dimensional plane with one or very few types of figures without overlaps and /or gaps. Designing tileable shapes include includes two aspects of difficulties. The first difficulty is that it is not easy to generate tileable figures with sufficient similarity to the given target figure because the search space is enormous and the variables are strongly interdependent. The second one is the shape-similarity metric functions are less able than human intuition to evaluate figure shape similarity. Therefore, this paper proposes a hierarchical optimization architecture that divides the problem into a few sub-problems. The combined methods resolve the sub-problems using their unique advantages. In particular, this study develops two methods based on the proposed architecture; the first method generates a tileable shape similar to the given goal figure shape, and the second method searches for poses of a prominent character in movies and animations suitable for tiling.

Chapter 1 describes the target problem class of this paper and its example problems, i.e., tileable figure design, and the proposed hierarchical optimization architecture. This chapter also describes the difference between the proposed architecture and related techniques such as hybrid optimization methods.

Chapter 2 explains related studies. First, it discusses the definition of the tileable figure design problem. Then, optimization and machine learning methods used in previous and these studies are explained. Next, this chapter discusses previous studies that analytically optimize the tileable figure shapes and meta-heuristics-based methods for directly modifying the tileable shapes.

Chapter 3 discusses the overview of the proposed architecture and proposes the first proposed method. This method attempts to solve the tileable shape generation problem under the same scenario as in the previous studies. The proposed method represents the tileable shape generation problem as a two-layer structure, and employs meta-heuristics as the upper-layer optimizer and the previous method for the lower-layer optimizer to find a figure that satisfies the edge-matching constraint. Experimental results showed that the proposed method generated a tileable shape close to the goal shape while satisfying the tiling conditions.

Chapter 4 describes the second proposed method that generates a goal shape suitable for tiling, which is a different scenario from the previous studies. In the previous studies and chapter 3 of this paper, the tileable shape generation problem assumed that a goal figure is drawn by hand; however, some goal shapes are hard to transform the tileable shape. For this reason, the previous methods, including the first proposed method, require redrawing the goal shape. The second proposed algorithm consists of three layers, and the upper-layer optimizer generates goal shapes by a combination of a convolutional auto-encoder-based generative model that allows parametric image morphing and an algorithm for global optimization in the latent variable space that finds goal shapes suitable for tiling. The second proposed method is expected to eliminate the trial and error of redrawing the goal shapes. Experimental results showed that the proposed method generated goal shapes suitable for tiling from videos, and in particular, it generated goal shapes of character poses that were not included in the videos.

Chapter 5 attempts to apply the proposed method to confectionery shape design as an example of industrial applications. Taking advantage of the hierarchical optimization, i.e., the flexibility of designing objective function and constraints, a new constraint that prevents generating narrow and fragile parts on a tileable output shape is introduced. Experimental results showed that the proposed method generated tileable shapes while preventing narrow and fragile parts.

Chapter 6 discusses the possibility of improving the convergence speed of the proposed method. The proposed algorithms in chapters 3 and 4 employ simple meta-heuristics for the easiness of interpretation the behavior of the algorithm and for the diversity of solutions generated. This chapter employs a more efficient meta-heuristic algorithm to speed up the search. Experiments were conducted to verify whether the response speed required for interactive optimization, which is being planned for future work, could be met. The results showed that the convergence speed was improved compared to the proposed algorithm in chapter 3.

Chapter 7 summarizes chapters 1 to 6 described so far.