

# 博士学位論文審査要旨

2015年2月13日

論文題目：意思決定のための設計空間探索と設計モード解析に関する研究

学位申請者：日和 悟

審査委員：

主査：生命医科学研究科 教授 廣安 知之

副査：生命医科学研究科 教授 太田 哲男

副査：理工学研究科 教授 三木 光範

要 旨：

工学設計問題は、設計の善し悪しを定量的に評価するための評価指標と、これに影響を与える調整可能な設計変数を用いて定式化できる。特に、実世界の設計問題には満たすべき要求が数多く存在するほか、設計変数の数も膨大であるため、このような高次元空間の中で良い設計を発見することは容易ではない。本研究では、工学設計における2つの重要なプロセスとして、(1) 性能要求を満たす設計を求める「設計空間探索」と、(2) 得られた設計候補群から設計案を選択する「意思決定」に着目している。(1)の課題は、設計変数が高次元であるため、探索すべき空間が膨大であり良好な設計を発見することが困難であること、また、性能要求を同時にすべて満足できないため、トレードオフを考慮して多様な設計候補群を求める必要があることである。(2)の課題は、(1)で得られた設計候補の数が膨大になった場合に、それらの特徴を1つ1つ吟味・比較して候補を絞り込むことの難しさである。本研究では、これら2つの主要課題に対して、多様かつ優れた解を高速に得るための「設計空間探索」と高次元かつ膨大な設計候補群から主要な設計パターンを抽出し、その特徴を定量的に分析するための「設計モード解析」の技術を開発し、その有効性を示している。本論文では、全6章で構成し、これらの結果を纏めている。

Chapter 1では、本研究の背景と動機について述べている。

Chapter 2では、設計空間探索のツールとしての多目的最適化の有効性と、多目的最適化問題の定義について述べるとともに、意思決定支援を実現するための設計探索と分析のフレームワークを提案している。

Chapter 3では、優れた解を高速に得るための多目的最適化フレームワークを提案している。そこでは、「解探索を2段階に分け、序盤では収束性を重視した探索を行い最適解に近接させた後、多様性を重視した探索を行う」方式を提案し、これを実現するためのアルゴリズムの設計方法を検討している。

Chapter 4は、「設計モード解析」について記述している。「設計モード」について定義を行うとともに、提案する設計モード解析の有効性を示す設計問題の例として、ハイブリッドロケットエンジンの概念設計問題を取り上げ、設計モード解析を適用して解の分析を試みている。その結果、提案手法の有効性を示している。

Chapter 5では、設計モード解析の応用事例として、医用データの時系列データ解析への適用を試みている。機能的近赤外分光法で得られる脳血流量変化の時系列データを用いることにより、提案手法が医用データに対しても高い有用性が存在することを示している。

Chapter 6では、本研究で得られた結論と今後の検討課題についてまとめている。

本論文の成果により、工学設計において意思決定者に多様な設計候補を提示することができ、かつそれらの特徴を定量的に分析・把握する事が可能となり、意思決定が容易になることが明らかとなった。従って本研究は設計工学分野において多大な恩恵をもたらすことが期待できるといえる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

## 総合試験結果の要旨

2015年2月13日

論文題目：意思決定のための設計空間探査と設計モード解析に関する研究

学位申請者：日和 悟

審査委員：

主 査： 生命医科学研究科 教授 廣安 知之

副 査： 生命医科学研究科 教授 太田 哲男

副 査： 理工学研究科 教授 三木 光範

### 要 旨：

本論文提出者は、2012年4月に同志社大学 大学院生命医科学研究科医工学・医情報学専攻 博士後期課程に入学し、それぞれの年度において優れた研究成果を挙げている。また、本研究科修了に必要な所定の単位を取得するとともに、英語の語学試験にも合格し、その能力についても十分な能力があると認定される。

本論文の主要部分は、Journal of Applied Mathematics 誌に掲載され高い評価を受けている。さらに、入学前の業績も含めて、学内紀要、3件の国際会議発表、5件の口頭発表を行っている。

2015年1月10日午後、主査、副査に対して個別に論文に関係した諸問題について口頭試験が実施された。その結果、提出者の十分な学力を確認することができた。

2015年1月17日午後3時30分から1時間半にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開催され、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明によりいずれも十分な理解が得られた。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 意思決定のための設計空間探索と設計モード解析に関する研究  
氏名： 日和 悟

## 要旨：

工学設計問題は、設計の善し悪しを定量的に評価するための評価指標と、これに影響を与える調整可能な設計変数を用いて、定式化できる。特に、実世界の設計問題には満たすべき要求が数多く存在するほか、設計変数の数も膨大であるため、このような高次元空間の中で良い設計を発見することは容易ではない。工学設計とは、複数の性能要求を満たす設計変数の組み合わせを探索し、自らが望む設計を選択していく、設計探索と意思決定のプロセスである。

一般的に工学設計は、対象物の機能や性能、制約条件を定める「要件定義」、要件を実現するための方式や処理手順、機能構造を定義する「概念設計」、概念設計をより具体化し、形状や寸法などの詳細を決定する「詳細設計」の3段階に分けられる。3つの中でも特に重要になるのが概念設計である。概念設計の終了段階で製品のライフサイクルコストの約80%が決まるという報告もあり、設計の上流段階で可能な設計候補を網羅・把握し、有望な設計候補に絞り込んでおくことが、後工程での手戻りや不具合を防ぐために重要である。

このような背景から、本研究では、工学設計における2つの重要なプロセスとして、(1)性能要求を満たす設計を求める「設計空間探索」と、(2)得られた設計候補群から設計案を選択する「意思決定」に着目している。(1)の課題は、設計変数が高次元であるため、探索すべき空間が膨大であり良好な設計を発見することが困難であること、また、性能要求を同時にすべて満足できないため、トレードオフを考慮して多様な設計候補群を求める必要があることである。

(2)の課題は、(1)で得られた設計候補の数が膨大になった場合に、それらの特徴を1つ1つ吟味・比較して候補を絞り込むことの難しさである。本研究では、これら2つの主要課題に対して、多様かつ優れた解を高速に得るための「設計空間探索」と高次元かつ膨大な設計候補群から主要な設計パターンを抽出し、その特徴を定量的に分析するための「設計モード解析」の技術を開発し、その有効性を示している。

本論文の構成は以下の全6章で構成される。

Chapter 1 では、本研究の背景と動機について述べている。

Chapter 2 では、意思決定問題における設計空間探索と最適化の関係について述べている。実世界の工学設計問題はしばしば多目的最適化問題として定式化できる。したがって多目的最適化の技術は、優れた設計候補を得るための設計空間探索に応用可能である。さらに、多目的最適化によって得られた解候補群の特徴を分析し、解の特徴と性能指標の関係を把握できれば、より良い設計を実現するための設計指針の獲得に繋がる。このような設計情報を意思決定者に提供し、より良い設計の実現を支援することが本研究の目的である。本章では、設計空間探索のツールとしての多目的最適化の有効性と、多目的最適化問題の定義について述べるとともに、意思決定支援を実現するための設計探索と分析のフレームワークを提案した。

Chapter 3 では、優れた解を高速に得るための多目的最適化フレームワークを提案している。

近年、多目的進化型アルゴリズム (MOEA) がその高い解探索性能と、多点探索により一度の探索で数多くの解が得られるという効率性から、広く用いられている。MOEA の性能指標として、得られる解候補群の「多様性」と最適解への「収束性」が挙げられる。多くの問題がこれらの指標を改善するために開発されてきたが、多様性と収束性を同時に向上させることは難しく、例えば解探索序盤から多様性を重視した場合には、収束性が悪化することが先行例で報告されている。すなわち多様性と収束性を解探索の中で制御することが重要である。本研究では、この制御方法として「解探索を2段階に分け、序盤では収束性を重視した探索を行い最適解に近接させた後、多様性を重視した探索を行う」方式を提案し、これを実現するためのアルゴリズムの設計方法を検討した。この探索スキームを実現するため、特徴の異なる2つのアルゴリズムを組み合わせ、収束性改善と多様性向上をそれぞれのアルゴリズムが担うハイブリッド方式を採用した。本方式は、既存のアルゴリズムを組み合わせるだけで精度向上が可能なため、汎用性に優れている。本研究では、収束性に優れた MOEA の枠組みとして参照点ベース MOEA を、多様性に優れた MOEA として分散協調スキームを採用した。参照点ベース MOEA は、目的関数空間において目標点 (参照点) を設定し、その付近に近い解ほど良好な解と判断することで収束性を改善するものである。分散協調スキームは、MOEA に加えて、単一の目的関数の最適解を探索するアルゴリズムを併用することで、得られる解の目的関数空間での広がり、すなわち多様性が向上する。提案フレームワークの有効性を示すため、著名な既存 MOEA として、NSGA-II と MOEA/D の2つの手法それぞれをベースにして提案手法を実装し、数学的テスト関数での性能評価により、いずれの実装例においても、既存の MOEA と比較して高い探索性能が得られることを示した。さらに提案手法では、2段階の探索を行うため、1段階目の探索において、収束度合いを判断する定量的な基準が必要となる。本研究では、探索中に生成した新しい解候補群が、すでに得られている良好な解を何個更新したかを定期的に計算し、これに閾値を設けることで収束の判断が可能であることを示した。また、閾値の設定が探索性能に及ぼす影響を数値実験により明らかにし、既存アルゴリズムを組み合わせることで性能向上を図るための設計指針を提供した。

Chapter 4 は、本研究の主構成要素のひとつである「設計モード解析」について記述している。まず、重要な概念として「設計モード」について定義した。この概念は、主成分分析の概念を拡張したものである。一般に主成分分析は、高次元データに対して、情報損失を最小限にしつつ低次元表現を導出するための次元削減法の側面が強いが、本研究では、主成分分析によって得られる平均ベクトルと各主成分に対応する固有ベクトルに着目し、「すべてのデータ (設計) は、平均ベクトルに対して、直交する固有ベクトルの線形結合によって表現できる」と解釈し、平均ベクトルをある設計群の平均的な設計を表す「基本設計」と定義し、さらに固有ベクトルを、任意の設計を表現するための最小構成要素と捉え、これを「設計モード」と定義した。提案する設計モード解析とは、設計候補群をクラスタリングによって分類し、この中で主成分分析を行い、平均ベクトルと設計モードの特徴を分析していく枠組みである。特徴分析では、設計モードと元の設計変数との相関係数である因子負荷量を用いて、どの設計変数が各設計モードに対して大きく寄与しているかを把握し、設計モードの特徴付けが可能である。また、任意の設計に対して各設計モードの示す方向に設計変数を動かし、目的関数空間での変化量をみることで、目的関数に対する設計モードの感度解析が可能である。提案する設計モード解析の有効性を示すため、設計問題の例として、ハイブリッドロケットエンジンの概念設計問題を取り上げ、設計モード解析を適用して解の分析を試みたところ、設計候補群が、それらの平均ベクトルと設計モードの線形結合で近似できることを示した。また、設計モードごとの因子負荷量を見ることで、当該設計問題では、酸化剤流量と燃料長さなど寄与度の高い設計変数を抽出できることを確認した。さらに、クラスタリングと主成分分析を階層的に繰り返すことで、クラスタごとに異なる平均ベクトルと設計モードが得られ、どの変数をどの程度動かせば、所属するクラスタの設計を表現できるかとい

う設計指針を抽出できることが分かった。

Chapter 5 では、設計モード解析の応用事例として、時系列データ解析への適用を試みた。時系列データの一例として、機能的近赤外分光法で得られる脳血流量変化の時系列データを用いた。まず、設計モード解析を時系列データに適用するための、データ表現の方法、クラスタリングや設計の近似に用いるためのデータ間の距離尺度の定義例を示した。脳血流量変化データの距離尺度として、動的時間伸縮法を用いることで、類似データに分類できることが分かった。また、クラスタ内の血流量変化データが測定プローブ配置上でどのように分布するかを調査し、脳機能局在論に基づいた各脳部位の機能との結びつけを検討した。本研究では視覚刺激に対するタスクを実施した際の脳血流量変化を計測したため、視覚情報処理を担う視覚野や、視覚情報の伝達経路上にクラスタが構成されている可能性を示した。さらに、各クラスタの固有ベクトルの意味付けを検討した。各クラスタの固有ベクトルが、別のクラスタ（脳部位）の活性化の影響を受ける可能性があることを仮説として、あるクラスタの第4モードまでの固有ベクトルに対して、全クラスタの平均ベクトルとの距離を計算したところ、第1, 2モードでは固有ベクトルが所属するクラスタの平均ベクトルが最短距離であったが、第3, 4モードでは別のクラスタの平均ベクトルが最短距離となる場合があった。すなわち、あるクラスタの血流量変化に対して、別のクラスタの影響が寄与率の低いモードの固有ベクトルとなって現れている可能性があることを示した。以上より、時系列データ解析に対しても設計モード解析を用いた解析が可能であることを示した。

Chapter 6 では、本研究で得られた結論と今後の検討課題についてまとめた。

本論文の成果により、工学設計において意思決定者に多様な設計候補を提示することができ、かつそれらの特徴を定量的に分析・把握する事が可能となり、意思決定が容易になった。従って本研究は設計工学分野において多大な恩恵をもたらすことが期待できる。