

論文の内容の要旨

論文題目 数値解析を活用した実機械の制御パラメータ最適化
における人と計算機の相補的關係の設計

氏 名 唐澤 宏之

機械設計は、物理現象に関する知識を駆使して、機械に求められる性能や制約を満たすような機構の組み合わせを見つける知的行為である。近年の計算機の発展により、人間が行っている設計行為の一部を計算機に代替させる動きが進んでいる。その背景には、物理現象を模擬するための数値解析技術の発展と、人間の探索を代替するための最適化手法の発展がある。本研究においては、数値解析を活用して実際の機械の制御パラメータの最適化する際に、人間と計算機がどのような機能を果たせば効率的な最適化が行えるかについて議論を行った。

図Aは関連研究でよく見られる「数値解析モデルを活用した最適化システム」を表す。本研究における制御パラメータ最適化もこのシステムをベースにしている。図Aのシステムにおいては、複雑な機械の動作を計算機上で模擬するために、数値解析モデルが利用されている。現象の模擬を計算機上で行うことにより、実機実験の実験コスト、事故などのリスクを低減することができる。数値解析モデルの入力と出力の関係は式の形にすることが困難であるため、パラメータの最適化にはブラックボックス最適化と呼ばれる手法がよく用いられる。図Aのシステムにおいて、数値解析モデルは物理現象を表し、目的関数は発生している物理現象の設計現場にとっての好ましさを表す。

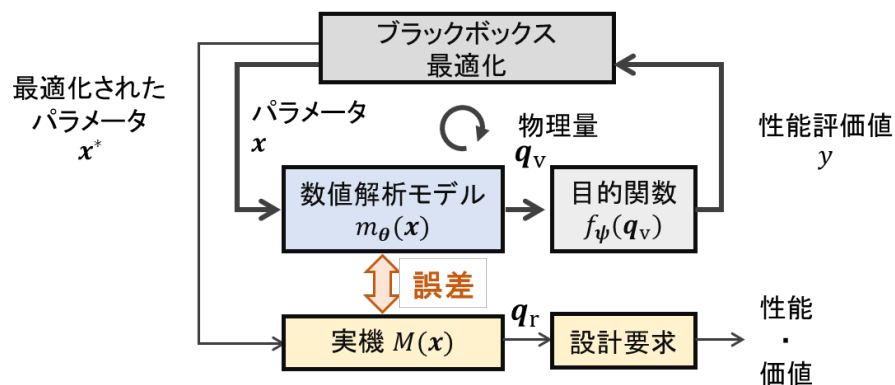


図 A. 数値解析モデルを活用した最適化システム。

数値解析モデルと現実の物理現象の間や目的関数と現実の設計要求の間には誤差が存在する。そのため、最適化システムで得られる結果を実機において利用するためには、制御パラメータのみならず、数値解析モデルや目的関数の誤差を小さくする必要がある。関連研究においては、様々な機械システムの数値解析モデルを対象として最適な制御パラメータを求めることが良く行われている。しかし、パラメータを実機で利用するために、どのように数値解析モデルや目的関数を修正していくかに関して議論がされることは少ない。それに対し、本研究においては、最適化システムを効率よく構築・改善していく仕組みである、「メタな最適化システム」を提案している。メタな最適化システムの機能の検証のため、本研究においては次の3つの研究目的を設定した。

1. 機械システムを最適化する既存手法・既存研究の整理 (1, 2章)
2. 最適化システムを構築・改善するための、メタな最適化システムの提案 (3章)
3. メタな最適化システムの内部機構の提案及び、実際の機械システムの最適化問題を通した検証 (3, 4, 5章)

最適化システムを改善していくメタな最適化においては、数値解析モデルと目的関数の修正が必要である。メタな最適化においては、これらの修正及び最適化を少ない資源や少ない時間で達成することが目標になる。これらの目標は機械設計を行う現場の要求を継承したものである。最適化の性能と資源・時間とはトレードオフの関係になっているため、修正にコストかかりすぎる場合は、修正を行わずに誤差を前提として最適化結果を設計に利用することもある。最適化アルゴリズムは、与えられたモデルや目的関数の中でパラメータを最適化するためのものであり、モデル自身や目的関数自身の修正を行うことができない。そのため、修正には、物理現象や計算原理、機械への要求を把握している人間の介入が必要である。人工知能の分野においては、アルゴリズムにモデル化能力を持たせて人間のような知性を発現させることを目指した手法が存在するが、モデルの形態が限られており、設計を行う人間の代替は出来ていない。

本研究では、メタな最適化を効率良く進めるためのメタな最適化システムの内部機構を提案し、現実の最適問題に適用した。提案する機構は次の3つである。

機構1は最適化結果の重要度に基づいたモデルと目的関数の修正機構である。この機構では、最適パラメータから遠い空間におけるモデルや目的関数の修正を省くことにより、実験や分析にかかるコストが低減される。

機構2は数値解析結果の再利用機構である。この機構では、数値解析結果が同様になるパラメータ間で結果が共有され、最適化における数値解析の時間を低減される。

機構3は補正係数導入によるモデル修正の自動化機構である。この機構では、数値解析モデルが近似する関数形状の情報の利用により実験コストが削減される。また、数値解析モデルの修正の自動化により、修正にかかる時間・人件費が低減される。

本研究では、提案する機構の効果を確かめるため2つの実機械システムの最適化問題を取り扱った。図Bのグラフは最適化問題の性質を表すグラフであり、横軸が目的関数の自明さ、縦軸が数値解析モデルの計算量を表す。本研究においてはグラフの右下と左上の二つの問題を取り扱った。右下はトランスミッションの制御パラメータ最適化問題であり、目的関数が自明ではなく、モデルに誤差が存在する問題である。それらの問題に対処するために、機構1の重要度に基づいた修正機構を利用した。左上は円筒研削加工の加工条件最適化という問題であり、多くの粒子が動的にふるまい、計算量が大きくなる問題である。計算量の削減のために、機構2の計算結果の再利用機構を利用した。また、この問題も、モデルの誤差が存在する問題であるため、機構1と3を組み合わせ、モデルを重点的に自動修正しモデル修正の効率を高めた。以降は具体的な最適化問題における検証結果について述べる。

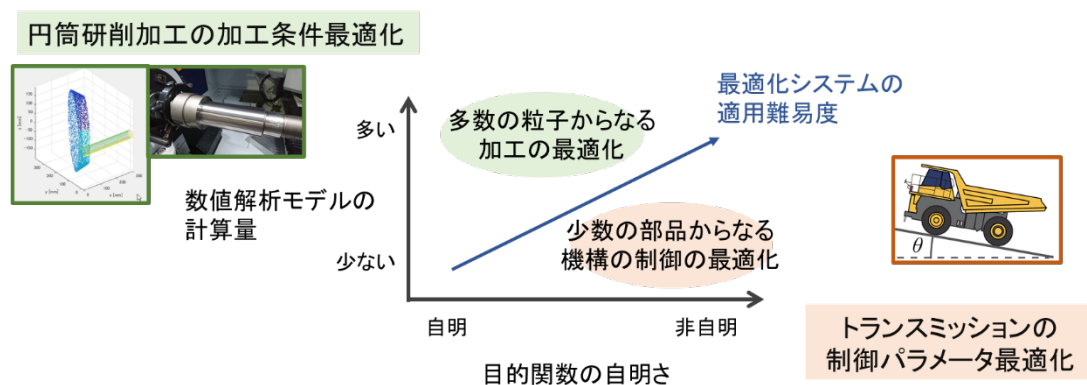


図 B. 数値解析モデルを活用した最適化が直面する課題。

トランスミッションとは、エンジン動力の効率的な利用のために車速に応じてエンジン回転を変速する機械であり、変速時には車体の慣性とエンジンの慣性との拮抗により、変速ショックが発生する。変速ショック低減のため、人手による制御パラメータ最適化が行われているが、性能が限定的であり、パラメータ最適化の自動化・効率化が求められている。数値解析モデルを利用した最適化システムでは、トランスミッションの制御に求められる多種類の性能目標を設定可能であり、設計現場の要望を良く反映することができる。

本研究においては、モデルの誤差や目的関数の非自明さに対応するため、機構1の重点的修正機構を取り入れたメタな最適化システムにより最適化とメタな最適化を実施した。その過程における、計算機上での最適化では、変速ショックが現行のパラメータと比べて低減された。メタな最適化の一環として、トランスミッションを搭載した実車を使って、実験を行った。その結果、実機においても、最適化によって変速ショックが低減された。また、メタな最適化により、計算機上での最適化を行うことにより最適解付近でのモデルの不備を明らかできることや、最適化された波形の観察をもとに目的関

数を修正していけることがわかった。

また、著者の研究においては、目的関数の多峰性を明にモデリングして局所最適解に陥ることを抑制する最適化手法である階層型確率的最適化を提案した。階層型確率的最適化はブラックボックス最適化手法の一種である。階層型確率的最適化はトランスミッションの最適化において、有名なブラックボックス最適化手法と比べ良い性能を示した。

円筒研削加工とは、砥石上の砥粒を加工物に連続的に当て、形状を削りだす加工方法である。円筒研削加工の加工条件の最適化においては、性能目標・変更可能なパラメータが複数存在し、人手による最適解の発見が困難になっている。

数値解析モデルを利用した最適化システムでは加工条件設定の柔軟性やモデルの再利用性が高いものの、円筒研削加工では砥石を構成する大量の砥粒により、数値解析モデルによる現象の模擬にかかる計算量が大きく、数値解析を活用した最適化が難しい。研削加工条件の最適化に関しては多くの研究が行われているが、数値解析モデルを利用した最適化は行われていない。

本研究においては円筒研削加工の数値解析モデルの開発と高速化を行い、最適化に用いた。モデルでは砥石を構成する一つ一つの砥粒と加工物の表面点群との接触を計算する。モデルの高速化のために、接触判定必要粒子の絞り込みと、転写形状の再利用という2種類の高速化手法を提案し、計算量の低減を実現した。この転写形状の再利用はメタな最適化システムにおける機構2の計算結果の再利用機構に相当する。これらの高速化により、計算機上での最適化が実用的な時間で実施できるようになった。そして、最適化アルゴリズムは粗加工と仕上げ加工を組み合わせるという人間から見ても妥当な加工条件を自発的に発見した。

また、計算機上の最適化結果を実機に効率的に適用するために、機構1の重点的要素修正と機構3の補正係数による修正自動化を取り入れたアルゴリズムの開発を行った。このアルゴリズムは関数の大局的形状は実機とモデルで同様であると仮定して、実機の少数データを利用して最適値周辺においてモデルを補正する。有効性検証のために実機を利用した実験を行い、実機において目的関数の値を向上させることに成功した。

以上のように、本研究においては、最適化システムを効率よく構築・改善していく仕組みである、メタな最適化システムという視点を提案し、メタな最適化システムを効率良く動かす機構を提案した。そしてそれらの機構を含んだメタな最適化システムに従って、実際の機械システムの制御パラメータの最適化を実施し、実機における制御性能を向上させるとともに、提案する機構の有効性を確認し、いくつかの改善点を明らかにした。