

京都大学	博士 (工学)	氏名	Do Kim Bach
論文題目	Probabilistic Approaches to Optimization of Steel Structures Considering Uncertainty (不確定性を考慮した鋼構造物の確率的最適化手法)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、鋼構造建築骨組の弾塑性材料パラメータ同定とパラメータのばらつきを考慮した設計のための確率的最適化手法を提案したものであり、9章からなっている。各章の要旨は以下のとおりである。</p> <p>第1章は序論であり、構造最適化の定式化とアルゴリズム、多目的最適化の概要、構造工学における不確定性考慮の必要性と、ロバスト最適化および信頼性最適設計法の概要を解説するとともに、本論の目的と構成を示している。</p> <p>第2章では、確率論と確率的方法の概要を示している。とくに、第3章以降で用いられるガウス過程モデルとそれに基づくベイズ最適化手法、混合ガウスモデルを解説し、簡単な例題を用いてその有効性を確認している。また、第7章で用いる鞍点近似法の概要を示している。</p> <p>第3章では、鋼材料の弾塑性繰返しパラメータを実験と有限要素解析によって同定するための確率的手法を提案している。鋼材料の弾塑性繰返し特性を非線形混合硬化則でモデル化し、単軸繰返し載荷試験あるいは片持ち梁の繰返し載荷試験の有限要素解析結果と実験結果の誤差を、ベイズ最適化手法によって最小化している。単一の実験データを用いる場合、計測ノイズを考慮する場合と考慮しない場合ともに、ベイズ最適化手法によって、同一の構造解析回数での遺伝的アルゴリズム (GA) と粒子群最適化よりも高精度で弾塑性繰返しパラメータを同定できる。一方、複数の実験データを用いる場合、誤差最小化問題は多目的最適化問題として定式化され、パレート最適解集合が目的関数空間に占める体積 (hypervolume) で定義される獲得関数を用いてパレート最適解の集合を生成することができる。また、提案した多目的最適化手法によって、特定のデータに依存するバイアスを低減し、同一の構造解析回数での多目的GAよりも高精度でパラメータを同定できることを示している。鋼材料の試験片の弾塑性繰返し実験は極めて困難であり、梁の繰返し載荷試験と有限要素解析を用いた弾塑性繰返しパラメータ同定手法は、実用的にも重要な成果である。</p> <p>第4章では、近似ベイズ計算を用いたベイズ推定に基づき、計測ノイズを含む実験結果を用いて鋼材料の弾塑性繰返しパラメータを同定する手法を提案している。マルコフ連鎖モンテカルロ法とベイズ最適化を併用した近似ベイズ計算により、ベイズ推定の事後分布を高精度で予測できることを、ベンチマークデータを用いて示した。また、サンプルを逐次追加する過程において、獲得関数で用いる指標を信頼性区間の下限値から分散に基づく量に変更することにより、事後分布の精度が向上することを示している。複数の実験データを用いて弾塑性繰返しパラメータを同定する際、精度は誤差を最小化する実験データの順序には依存しないが、獲得関数の種類には大きく依存することを示している。</p> <p>第5章では、材料と荷重の不確定性を考慮して鋼構造平面骨組を設計するための多目的ロバスト最適化問題を、混合ガウスモデルを用いて解く手法を提案している。応答量の確率分布を混合ガウスモデルで近似すると、部材の特性を定める離散変数である設計変数が定められたときの応答量の確率分布を、設計変数の不確定性を定める周辺確率分布を用いて求めることができる。多目的GAとの比較により、提案した手法を用いると、平面骨組の質量と最大層間変位の平均および分散を目的関数とした多目的ロバスト最適化問題のパレート最適解の集合を、高精度かつ少ない計算量で求めることができることを示している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	Do Kim Bach
<p>第6章では、鋼構造平面骨組の応答量で定められる複数の限界状態関数の個別確率あるいは同時確率に関する制約を考慮した多目的ロバスト最適設計問題を対象として、ベイズ最適化による手法を提案している。個別確率と同時確率それぞれに関する制約を有する最適化問題に対し、解の改善と制約条件を満たす許容方向への探索を同時に考慮した獲得関数を提案した。離散変数と連続パラメータの両方に不確定性を有する平面骨組の多目的最適化問題の例題を通じて、提案した手法を用いると、パレート最適解を高精度かつ少ない計算量で得ることができることを示している。</p> <p>第7章では、鋼構造物の最適信頼性設計を対象として、逐次混合ガウス過程回帰と鞍点近似による方法を提案している。不確定を有する設計変数とパラメータで構成される入力データの空間を複数のクラスターに分類し、クラスターごとにガウス過程モデルを作成して応答量を近似する。サンプル点を逐次追加して、限界状態関数を鞍点近似で評価することにより、指定された信頼性を有する設計を少ない構造解析の回数で求めることができる。さらに、確定的最適化問題を逐次解くことにより、指定したリスクレベルを有する解を得る方法を提案し、離散変数と連続パラメータを有する問題への有効性を平面骨組の例で検証している。</p> <p>第8章では、多目的最適信頼性設計問題のための逐次サンプリング手法を提案している。応答量をガウス過程回帰でモデル化して最適化を繰返し実行し、各ステップで hypervolume を最大化する解とパレート解近傍の複数の解を追加する手法である。提案した方法を用いると、鋼構造平面骨組の質量と弾塑性時刻歴応答解析で得られる地震時のエネルギー消費量に関する信頼性を考慮した2目的最適化問題に対するパレート解を効率よく得られることを示している。</p> <p>第9章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	Do Kim Bach
----	-------------

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、鋼構造建築骨組の弾塑性材料パラメータ同定とパラメータのばらつきを考慮した設計のための確率的最適化手法を提案している。以下、その内容と得られた結果を記す。

(1) 鋼梁の弾塑性繰返し載荷実験の試験体を有限要素でモデル化し、多くの計算時間を必要とする有限要素解析によって得られる弾塑性繰返し応答量を用いて、鋼材料のパラメータを同定するための確率的手法を提案した。実験と解析の誤差を最小化するためベイズ最適化手法を用い、パレート最適解集合が目的関数空間に占める体積 (hypervolume) を用いた獲得関数を提案した。また、複数の実験データを用いて多目的最適化問題を解くことにより、特定のデータに依存するバイアスを低減できることを示した。

(2) 近似ベイズ計算を用いたベイズ推定に基づき、鋼材料の弾塑性繰返しパラメータを同定する手法を提案した。マルコフ連鎖モンテカルロ法とベイズ最適化を併用し、サンプルを逐次追加する過程の途中で獲得関数を変更することにより、材料パラメータの分布を精度よく推定できることを示した。

(3) 材料と荷重の不確定性を考慮して、鋼構造物を設計するための多目的ロバスト最適化手法を提案した。設計変数と不確実なパラメータの関数である応答量を混合ガウスモデルで近似することにより、少ない計算量でパレート最適解が得られることを示した。

(4) 複数の限界状態関数の個別確率あるいは同時確率に関する制約を考慮した多目的ロバスト最適設計問題を対象として、ベイズ最適化による手法を提案した。解の改善と許容方向への探索を同時に考慮した獲得関数を提案し、離散変数と連続パラメータを有する問題への有効性を平面骨組の例で検証した。

(5) 鋼構造物の最適信頼性設計を対象として、逐次混合ガウス過程回帰と鞍点近似による手法を提案した。不確実なパラメータを有する骨組の応答量を複数のガウス過程回帰で近似し、サンプル点を逐次追加して、限界状態関数値を鞍点近似で求めることにより、指定された信頼性を有する設計を少ない構造解析の回数で求めることができることを示した。さらに、逐次ガウス過程回帰を用いることにより、弾塑性時刻歴応答解析で得られる応答量に関する信頼性を考慮した 2 目的最適化問題のパレート解集合が容易に得られることを示した。

本論文は、鋼構造建築骨組の弾塑性材料パラメータ同定とパラメータのばらつきを考慮した設計のための確率的最適化手法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 1 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。