



コンプライアントモーフィング翼型のトポロジー最適設計に関する研究

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: ja 出版者: 公開日: 2024-04-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 上林, 恵太 メールアドレス: 所属: |
| URL | https://doi.org/10.24729/0002000657 |

氏 名 上林 恵太

学位の種類 博士(工学)

学位授与年月日 2024年3月31日

学位論文名 コンプライアントモーフィング翼型のトポロジー最適設計に関する研究

論文審査委員 主査 工学研究科 小木曾 望

副査 工学研究科 岩佐 貴史

副査 工学研究科 佐々木 大輔

論文内容の要旨

本研究は、モーフィングフラップの連続的で滑らかな変形を実現するための最適なコンプライアント内部機構をトポロジー最適設計により明らかにすることを目的とする。将来航空機の低燃費化・低騒音化への一方策にモーフィングフラップがある。このフラップが外形形状を積極的に変形させるためには、内部に変形するための機構が必要である。この内部機構にコンプライアント機構を採用することで、装置の簡素化や変形するための柔軟性、空気力に対する耐荷重性を併せ持つことが期待できる。一方、その設計には、空気力学と構造力学を同時に考慮する複合領域にわたる最適設計手法が必要となる。そのため、本研究では、設計自由度が最も高いトポロジー最適設計手法を基に、空力と構造のどちらの観点からも優れたコンプライアントモーフィングフラップを求める最適設計手法の構築を目指す。

以下に、本論文の研究内容を、以下の3つの項目に分けて示す。その後、各項目の概要について述べる。

項目(1) 既定目標形状へと達成するためのコンプライアントモーフィングフラップの内部機構のトポロジー最適設計法を提案した。

項目(2) 有限変形を考慮したモーフィングフラップ内部構造のトポロジー最適設計法を提案した。この有限変形の解析には非線形解析が必要となるため、数値不安定性が生じることがある。この数値不安定性を抑止する構造モデル化法と非線形有限変形解析とを統合したトポロジー最適設計手法を開発し、コンプライアントモーフィングフラップへ適用した。

項目(3) モーフィング変形をした後の翼型の空力性能と内部機構の構造性能とを同時に最適化するトポロジー最適設計法を提案した。空力モデルを従来のトポロジー最適設計手法に統合し、空力性能と構造性能との双方が優れたコンプライアントモーフィングフラップを設計した。

項目(1)では、効率よくモーフィング変形を実現するために、複数のリブをスパン方向に配置する多層リブ構造を提案した。そこでは、計算コストを抑えるために、各リブ層が翼表皮のみで互いに変位が等しくなるよう連成解

析を行うことで、本来3次元で表現されるこのモデルを2次元でモデル化するための工夫を行った。そして、既定の目標形状との誤差量を最小化する最適設計問題を定式化し、目標形状へと達成するコンプライアントモーフィングフラップの内部機構をトポロジー最適化により求めた。また、入力アクチュエータ荷重を切り替えることで異なる飛行状況に適した変形形状へと達成する多目的最適設計を提案した。トポロジー最適化法の設計自由度の高さがモーフィング翼の内部構造設計問題に対して一定の有効性があることを示した。

項目(2)では、項目(1)で考慮していなかった非線形有限変形を再現したコンプライアントモーフィングフラップのトポロジー最適設計を行った。従来の方法では、最適設計過程の構造変化によって、非線形有限変形解析実行時に数値不安定性が生じ、解析が止まってしまうことがある。こうした数値不安定性を取り除くために、メッシュアダプテーション法と非線形有限変形解析を統合したトポロジー最適設計法を提案した。これにより、構造表現と変形挙動のどちらも精度を向上させ、その上に数値不安定性を回避する設計手法が実現できた。そして、いくつかの数値計算例を通して、目標形状へと達成するコンプライアントモーフィングフラップ設計解を求めることで、設計手法の有効性を示した。

項目(3)では、モーフィング変形をした後の翼型の空力性能と内部機構の構造性能とを同時に最適化するトポロジー最適設計手法を提案し、コンプライアントモーフィングフラップへ適用した。上記の2項目では、事前に目標形状を設定する必要があった。その形状には空力性能が最大となる理想的な形状を選択することができるが、構造変形により達成可能かどうかは事前にわからないという問題がある。最適設計ではその目標形状に近づけるが、形状が近いからと言って空力性能が優れているという保証はない。また、構造性能が犠牲となる可能性があるという問題もある。これを解決するために、変形後の形状と内部の機構とを同時に求めるトポロジー最適設計法を提案した。この手法では、計算コストを抑えるために、空力解析にはポテンシャル流れを仮定したパネル法を採用し、これまで用いてきた有限要素法を用いた構造モデルとの間の相互作用を考慮できるトポロジー最適設計を提案した。そこでは、構造から空力への一方向作用のみを考慮し、変形後翼型の空力性能を向上させるための構造探索指針である感度を導出した、この感度に基づくトポロジー最適設計によりコンプライアントモーフィングフラップを求めることで、空力性能と構造性能を同時に最適化できていることを確かめた。

以上の内容に基づき、本論文は、6章によって構成される。以下に、各章の構成と概要を示す。第1章では、研究の背景と論文構成について述べる。第2章では本研究で設計対象とするコンプライアントモーフィングフラップと設計手法であるトポロジー最適設計について述べる。3章と4、5章では項目(1)、(2)、(3)の内容についてそれぞれ述べ、第6章では結論と今後の課題を述べる。

論文審査結果の要旨

本論文は、航空機の低燃費化・低騒音化の一方策として提案されているモーフィング翼の内部機構として有力な候補であるコンプライアント機構を採用したコンプライアントモーフィング翼型に対して、空気力学と構造力学を同時に考慮する複合領域にわたるトポロジー最適設計法を提案した研究であり、以下の成果を得た。

(1) スパン方向に複数のリブを配置する多層リブ構造からなるモーフィング翼型を提案し、目標モーフィング形状を達成できるコンプライアントモーフィング翼型の内部機構として合理的な内部構造をレベルセット法に基づくトポロジー最適化により求めた。この手法では、計算コストを抑えるために、各リブ層が翼表皮のみで互いに変位が等しくなるような連成解析を行うことで、本来、3次元で表現されるこのモデルを2次元でのモデル化で実現する手法を提案した。さらに、入力荷重を切り替えることで複数のモーフィング形状を1つの内部機構を提

案し、多目的最適設計法に拡張することでそのようなモーフィング翼型の内部構造が実現できることを示した。

(2) (1)では考慮できていなかった有限変形を取り扱うために、トポロジー最適設計と非線形有限要素法とを組み合わせたコンプライアントモーフィング翼型の高精度な設計法を提案した。通常のトポロジー最適設計法においては、空洞領域は剛性の低い材料でモデル化される。しかし、有限変形を考慮する場合、剛性の低い材料は変形が大きくなるためにメッシュが潰れるなどの数値不安定を生じてしまうことがある。その問題を解決するために、空洞領域を真の空白部分として材料領域のみを要素分割して非線形有限要素法を安定して実行できるメッシュアダプテーション法とトポロジー最適設計法を統合する設計手法を構築した。数値計算例を通して、非線形有限要素法に基づいて得られたコンプライアントモーフィング翼型の利点を明らかにした。

(3) 上記の2項目の手法では、目標モーフィング形状をあらかじめ決める必要があった。しかし、構造変形によってその目標形状が実現可能かどうかは不明であり、また目標形状に近いと言って空力性能が優れているとは限らないという問題がある。これを解決するために、空力性能と構造性能とを同時に最適化するトポロジー最適設計法を提案した。そのために、変形後の翼型の空力特性を向上させるためには構造形態をどう変化させればよいかに着目した効率的な感度解析を導入・実装し、同時最適化手法を構築した。そして、数値計算例を通して、この手法の有効性を明らかにした。

以上の諸成果は、コンプライアントモーフィング翼型に対する効率的なトポロジー最適設計法を実現できることを示したものである。特に、トポロジー最適設計の適用範囲を有限変形問題、構造と空力の連成問題へと拡張できたことは、モーフィング翼の設計だけでなく、複合領域のトポロジー最適設計に大いに貢献する成果である。さらに、これらの知見は、さまざまな工学分野から厳しい設計要求が課せられる航空宇宙システムの学術的な発展に貢献するものである。また、申請者が自律して研究活動を行うための必要な能力および学識を有することを証したものである。よって、本論文の著者は、博士（工学）の学位を受ける資格を有するものと認める。