

氏名	小野寺 誠
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 1160 号
学位授与年月日	令和 2 年 3 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	複雑な曲面や突起形状を有する構造物への高精度解析モデル生成技術 (High-precision analysis model generation technique for structures with complicated curved surfaces and protrusion shapes)
論文審査委員	委員長 教授 綿貫 啓一 委員 教授 長嶺 拓夫 委員 教授 高崎 正也 委員 准教授 楓 和憲

論文の内容の要旨

自動車や電機など製造業においては、CAE（Computer Aided Engineering）を用いて試作の一部を代替し、短時間で信頼性の高い製品を提供する取組みを行っている。ここで課題となるのが解析モデルの作成である。解析モデルの作成作業は、経験やノウハウに基づくなど属人性が高い。また、解析精度を保証するためにメッシュ品質の仕様が部位毎に細かく規定されておりメッシュ作成工数が膨大になることが課題となっている。本研究では、実績のある過去の解析データに着目し、過去の CAD（Computer Aided Design）データとメッシュデータをデータベース化し、新設計形状の解析モデルに再利用することで、過去データと同水準の高品質解析モデルを自動生成する技術を開発した。解析モデルの作成工数を削減するとともに、メッシュ品質の標準化を実現できる。これまでに自動車部品やバイク部品、鉄道車両部品などに適用し、解析モデル作成工数を 30% 以上削減できることを確認している。

第 1 章では、従来技術の問題点を整理し、本研究の目的を示している。

第 2 章では、本研究による課題解決のアプローチ、および解決手段の全体概要を示している。本研究においては、新設計の CAD データと過去の CAD データを比較し、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術、厚みのあるソリッドモデルから解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術、の 3 つのコア技術から構成される。

第 3 章では、開発した技術およびシステムの構成を示している。また、再利用する CAD データとメッシュデータのデータベースの構成についても説明している。

第 4 章では、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術の詳細を示している。3D-CAD モデルを構成する面（Surface）をノード、隣接している 2 つの面をエッジでつないだグラフを用いている。メッシュの作成対象である新設計形状の CAD モデルに対して作成したグラフから検索キーとなるノウハウ DB に登録されているノウハウ形状に対して作成したグラフと類似する部分グラフを検索し、部分グラフに対して類似度を計算する。類似度としては、幾何的な類似度と、位相的な類似度を用い、これらの線形和とした。

幾何的な類似度は、面積や周長などの幾何情報に基づいて計算する。位相的な類似度は、面の接続関係（位相情報）に基づいて計算する。この類似度がしきい値以上となる部分グラフを類似部分形状として検索する。

自動車ドアスイッチカバー部品に適用し、部品間の嵌め合い形状であるスナップフィット構造やボス構造、補強のためのリブ構造に対して、寸法が異なったり、フィレット有無の違いなどを、類似度として定量化し、再利用可能な部分形状を検索できることを確認している。

第5章では、厚みのあるソリッド部品から解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術の詳細を示している。自動車のボディー形状（外板やバンパー、ドアパネルなど）ように大規模な薄板構造物をソリッドモデルで解析することは、解析規模が大きくなるので実用的ではない。一般的に中立面や梁で代表したシェルモデルや梁モデルを用いて解析する。

鉄道車両部品などに開発した技術を適用し、この有効性を確認している。

第6章では、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術の詳細を示している。メッシュを変形させる手法としては、面間の距離や円筒面の径などの寸法に基づいてメッシュをパラメトリックに変形するパラメトリックメッシュモーフィング、リブやボスなどのフィーチャの追加や削除を行えるフィーチャ追加削除モーフィング、メッシュに対して制御領域、変形領域、固定領域を指定して変形するフリーフォームモーフィング、指定された変形後形状にメッシュをフィッティングさせるフィッティングモーフィング、の4つの手法を開発した。さらには、メッシュモーフィング後にゆがみの大きくなったメッシュの品質を改善するメッシュモーフィング対応品質改善技術も開発した。

自動車部品に適用し、この有効性を確認している。

第7章では、これら一連の技術を活用し、自動車ドアスイッチカバー部品の高品質メッシュを作成したプロセスと結果および考察を示している。

最後に第8章では、各章で得られた結論および成果を要約し、今後の研究課題と将来の展望について示している。

論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、2020年2月4日に博士論文発表会を開催し、その発表を含めて学位論文の審査を行った。学位論文の概要は、以下のとおりである。

本論文は、実績のある過去の解析データに活用し、過去のCAD (Computer Aided Design) データとメッシュデータをデータベース化し、新設計形状の解析モデルに再利用することで、過去データと同水準の高品質解析モデルを自動生成する技術の研究開発に関するものである。その実現のために、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術、厚みのあるソリッド部品から解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術、の3つの技術を開発している。

第1章では、従来技術の問題点を整理し、研究の目的を示している。自動車や電機など製造業においては、CAE (Computer Aided Engineering) を用いて試作の一部を代替し、短期間で信頼性の高い製品を提供する取り組みを行っており、ここで課題となるのが解析モデルの作成である。解析モデルの作成作業は、経験やノウハウに基づくなど属人性が高く、また、解析精度を保証するためにメッシュ品質の仕様が部位毎に細かく規定されておりメッシュ作成工数が膨大になることが課題となっている。このような課題を解決し、「ノウハウに基づいてCAE作業を自動化し、工数削減」、「ノウハウの進展に自動化ツールも追従」することを目的として示している。

第2章では、課題解決のアプローチおよび解決手段の全体概要を示している。新設計のCADデータと過去のCADデータを比較し、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術、厚みのあるソリッドモデルから解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術、の3つのコア技術から構成され、この処理手順について示している。

第3章では、開発した技術およびシステムの構成を示している。また、再利用するCADデータとメッシュデータ (ノウハウデータ) のデータベースの構成についても説明している。ユーザインタフェースはすべてWebブラウザ上で動作するように実装されており、また、ノウハウデータはクラウドサーバで管理できるようにしている。

第4章では、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術の詳細を示している。3D CADモデルを構成する面をノード、隣接している2つの面をエッジでつないだグラフを用いている。メッシュの作成対象である新設計形状のCADモデル (ターゲット形状) に対して作成したグラフから検索キーとなるノウハウDBに登録されているノウハウ形状に対して作成したグラフと類似する部分グラフを検索し、部分グラフに対して類似度を計算している。類似度は、幾何的な類似度と、位相的な類似度を用い、これらの線形和として計算している。幾何的な類似度は、面積や周長などの幾何情報に基づいて計算する。位相的な類似度は、面の接続関係 (位相情報) に基づいて計算する。この類似度がしきい値以上となる部分グラフを検索ターゲットのグラフから探索する。電子機器カバー部品に適用し、部品間の嵌め合い形状であるスナップフィット構造やボス構造、補強のためのリブ構造に対して、寸法の違い、フィレット有無の違いなどを、類似度として定量化し、再利用可能な部分形状を検索できると、結論付けている。

第5章では、厚みのあるソリッド部品から解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術の詳細を示している。また、従来技術では、何的な中央に中立面モデルを作成するが、特に板厚が一定ではない形状において、解析種類によっては十分な精度で解析できない場合があることを示して

いる。そこで、ソリッドモデルの薄板対向面を面間距離から求め、薄板対向面群の一方の面をオフセットすることで中立面を作成する手法を提案し、開発している。ブラケット部品や携帯電話カバー部品に適用し、3分以内で中立面を作成でき、また、薄板部の面の対向関係を指定することで、中立面モデルの形状を制御可能であるので、解析の用途に合わせて、解析モデルとして等価な中立面を作成できると、結論付けている。

第6章では、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術の詳細を示している。メッシュを変形させる手法としては、面間の距離や円筒面の径などの寸法に基づいてメッシュをパラメトリックに変形するパラメトリックメッシュモーフィング、リブやボスなどのフィーチャの追加や削除を行えるフィーチャ追加削除モーフィング、メッシュに対して制御領域、変形領域、固定領域を指定して変形するフリーフォームモーフィング、指定された変形後形状にメッシュをフィッティングさせるフィッティングモーフィング、の4つの手法を開発している。さらには、メッシュモーフィング後にゆがみの大きくなったメッシュの品質を改善するメッシュモーフィング対応品質改善技術も開発している。特徴的な技術として、メッシュの外表面の要素面に対して幾何特徴として曲面の種類（平面や円筒面など）やパラメータ（中心軸や頂点など）、および幾何拘束として幾何特徴間の関係（平行／垂直や接線連続）を自動認識する技術を示している。これにより、平面等の幾何特徴および平行等の幾何特徴間の関係を維持したままメッシュを変形できる。ピストンやブラケット、オイルポンプハウジングなどの部品に適用し、その有効性を明らかにしている。

第7章では、これら一連の技術を活用し、自動車ドアスイッチカバー部品の高品質メッシュを作成したプロセスと結果および考察を示している。実績のある過去の解析データをデータベース化し、新設計形状の解析モデルに部分的に再利用し組み合わせることで、過去データと同水準の高品質解析モデルを自動生成できることが特長である。自動車ドアスイッチカバー部品に適用し、従来は4～8時間程度の時間を要していたメッシュ作成作業を2分未満と大幅に削減できると、結論付けている。

最後に第8章では、各章で得られた結論および成果を要約し、今後の研究課題と将来の展望について示している。

本論文では、突起物や曲面を有する複雑な構造物に対して、過去データと同水準の高品質解析モデルを自動生成する技術の開発とその適用・検証を実施し、有用性を明らかにしている。従来技術は幾何学的に正多角形や正多面体を作成する手法であったのに対して、本研究では、実績のある過去の解析データを部分的に再利用するという、新しい手法を提案しており、設計業務や解析業務の効率化を実証している点は優れた業績である。また、本論文に関連した一連の研究において、学術的、工学的に非常に有意義な新しい知見が得られていることが認められ、その成果は高く評価できる。研究成果の主要部分は、査読付き論文11編に掲載されており、国際会議1件の口頭発表を行うなどの実績を有していることを確認した。

以上より、本学位論文審査委員会は、本学位論文が博士（工学）の学位に相応しいものであると判断し、全員一致で合格と判定した。