

論文審査の結果の要旨

氏名 稲垣 和久

本論文は、全 5 章から構成されている。

第 1 章では本研究の背景と課題について説明し、それを踏まえ本研究の目的を述べている。

始めに近年の電子機器の構造信頼性評価において、モバイル電子機器の圧迫解析の需要が増していることを述べている。その上で、解析の手番短縮および詳細化に向けた実用上の課題として、多数の接触・結合を含む対象モデルにおいて収束性の高い接触解法の必要性和、メニーコアの並列計算環境を活用した大規模接触解析の必要性を指摘している。

本研究では、電子機器の圧迫解析を想定した大規模接触問題に対し、効率的な計算手法を確立することを目的としている。接触解析の収束性に関しては、圧迫解析が多数の接触制約を含む不等式制約付き最適化問題であることから、その数理解法として内点法に着目し、当該解析における有効性を検証するとしている。また大規模接触解析に対しては、領域分割に基づく並列有限要素法の枠組みの中で、接触可能面積が広い一方で接触点の滑りが少ないモデル特性に着目し、本問題に有利な並列化手法を構築するとしている。

第 2 章では本研究における基礎理論について述べている。

接触を含む固体の連続体力学の基礎方程式について有限要素離散化した式を導出し、特に本研究で対象とする結合拘束を含む摩擦なし **node to surface** 接触問題が、節点変位を変数とする不等式制約付き非線形最適化問題に帰着することを述べている。

第 3 章では電子機器の圧迫解析に有効な接触解法として内点法による接触解析を提案している。

始めに接触問題に対する主双対内点法について、結合拘束を含む接触解析への拡張を行った上で簡易形状から実際の電子機器に至る複数の解析モデルにおいて収束性を検討している。有効制約法に基づく既存の接触解法と、解の精度と反復回数（本論文ではホットスポットである直接法線形方程式ソルバの実行回数としている）を比較し、同等の解が最大 20%程度少ない反復で得られることを示した上で、主双対内点法が有利であると結論づけている。合わせて簡易な平行板のモデルで接触範囲の広さを徐々に変えた場合の反復回数の変化を調べ、内点法は接触範囲の広い問題において既存解法より有利であることが示唆されるとしている。

次に前述の手法を Mehrotra の予測子修正子法によって高速化する手法が提案され、

同様の数値実験によって主双対内点法より実計算時間で 40%程度高速化されることが示されている。

さらに、より一般的な条件である大変形・増分解析において、標準的な主双対内点法は前ステップの解を活用できないことを指摘した上で、**warm-start** 法によって全体の反復回数を減らす方法を提案している。前述のモデルの条件を、幾何学的非線形を考慮した増分解析に変えた例に対して数値実験を行い、反復回数の累計が主双対内点法より 20%から 50%程度減少することが示されている。

第 4 章では領域分割に基づく有限要素接触解析の並列化について述べた上で、電子機器モデルにおける大規模並列接触解析手法の提案を行っている。

始めに大規模モデルの領域分割処理について、通信節点探索の計算負荷が高くなっていることを示し、これが **index list** によって数千倍高速化されることが示されている。

さらにマスタスレーブ要素によって接触の接続関係と通常の構造体領域を一体に領域分割する並列化手法を提案し、節点数 1,000 万弱の大規模サーバモデルにおいて、各制約条件処理手法と当該手法を組み合わせた場合の計算時間を調べている。主双対内点法と有効制約法の比較では、有効制約法でチャタリングが起きた当該ケースでも内点法で解が得られることを確認している。また拡張 **Lagrange** 法と反復法の組合せでは並列化効率 70%以上のスケール性能を確認し、直接法ソルバが適用不可能な大規模な接触問題に対して有用であると結論づけている。

第 5 章では本研究で得られた結論をまとめて述べている。

以上の通り、本論文は電子機器の圧迫解析を想定した大規模接触問題に対し、内点法に基づく接触解析手法と、接触要素による並列計算法を提案し、実際の大規模電子機器モデルによる検証を通してその有効性を示したものである。なお、本論文第 3 章、第 4 章は、奥田洋司、橋本学との共同研究であるが、論文提出者が主体となって手法の導出、数値実験および考察を行っており、論文提出者の寄与が十分であると判断する。提案手法は電子機器を始め、同様の形態の複雑な接触問題に対しても効果が期待され、産業における製品構造設計の効率化に対して広く寄与するものと考えられる。したがって、博士（環境学）の学位を授与できると認める。

以上 1 9 2 4 字