

接触を伴う物体運動に対する高品質四面体メッシュ生成のためのメッシュ適合

北海道大学 ○前濱 宏樹, 伊達 宏昭, 金井 理

要旨

CAEにおける組立部品の有限要素解析の効率化のため、空間と物体の両方を分割した四面体メッシュにおける接触を伴う物体運動への適合手法を提案する。本手法では、まず接触部周辺の空間の要素を除去し、物体を運動させる。次に、接触面と運動物体周辺の空間の要素の頂点移動と局所位相変更による適合と、要素が除去された空間のメッシュ分割を行う。各処理後に局所メッシュ品質改善を行い、物体運動に適合したメッシュを得る。

1 はじめに

近年、組立製品に対して、構造解析や電磁場解析等の様々な解析が求められている。現在の工業製品の形状設計のプロセスでは、これらの解析に必要なメッシュをソリッドモデルのメッシュ分割により生成しているが、メッシュ分割処理は不安定で計算コストが高いという問題がある。例えば、モータ等の可動部を含む組立製品においては、その運動を細かい時間ステップに分けて解析を実施するため、各ステップで別々な解析用メッシュを必要とする。その結果、メッシュ分割回数が多くなり、図 1(a)に示されるような、従来プロセスは非効率的で不安定である。

本研究では図 1(b)に示すように、空間と物体が分割された解析用四面体メッシュの物体運動に対するメッシュ適合手法を提案し、空間の分割も必要とする組立製品の解析に用いる各時間ステップの解析用メッシュの効率的な生成を実現する。関連研究として、Dobrzynski らのメッシュ適合手法^[1]等が挙げられるが、これらは運動する物体が他の物体と接触する場合に適用できない。そこで本研究では四面体メッシュの接触を伴う物体運動への適合手法を提案する。

2 提案する四面体メッシュ内の物体運動手法

2.1 概要

提案手法では、空間と物体の両方を分割した四面体メッシュを入力とする。物体、空間を分割したメッシュをそれぞれ物体メッシュ、空間メッシュと呼び、これらは境界で頂点、エッジ、三角形を共有しているものとする。また、各四面体には属する物体固有の番号が付与されているものとする。提案手法ではその他に、運動の時間ステップ幅 Δt 、終了時刻、各時間ステップで物体運動を記述する剛体変換行列の系列を入力とする。なお、物体間の接触面の形状は平面、円筒面、円錐面、球面、トーラス面のいずれかとし、運動する物体は他の物体内に侵入しないものとする。

手法概要を図 2 に示す。本手法はセグメンテーション (A1)、格子生成 (A2)、接触領域及び変形領域抽出 (A3, A4) 及びメッシュ適合 (A5) からなる。以下に詳細を記す。

2.2 セグメンテーション (A1)

物体メッシュに対し、既開発の表面メッシュセグメンテーション手法^[2]を適用し、表面領域 (セグメント) を求める。結果の表面領域は平面、円筒面、円錐面、球面、トーラス面のいずれかに分類され、その曲面パラメータが計算される。また、これら表面領域間の境界線を領域境界線と呼び、それらを直線あるいは円錐曲線のいずれかに分類し、その曲線パラメータを求める。

2.3 格子生成 (A2)

運動する物体メッシュ M_m 表面近傍の空間メッシュの要素集合 (変形領域) の抽出と、運動により M_m が接触する物体メッシュ M_c の効率的な抽出のため、既提案法^[3]を用いて M_m 表面からの距離場を与える距離場格子 G_d を求める。また、 G_d の距離値を用いて M_m の表面から一定距離内の頂点を得るための頂点探索格子 G_v を生成する。 G_d は M_m を覆うように生成し、各セルには M_m 表面からのマンハッタン距離を与える。一方で、 G_v はメッシュ全体を覆うように生成し、各セルには包含するメッシュ頂点を登録する。

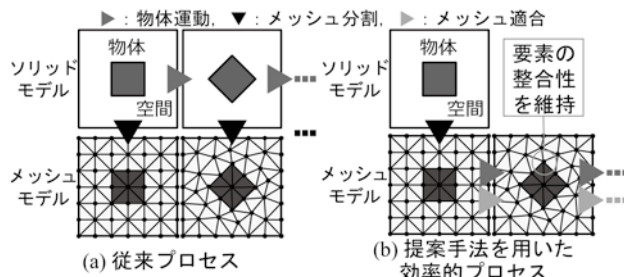


図 1 可動部を含む組立製品の解析

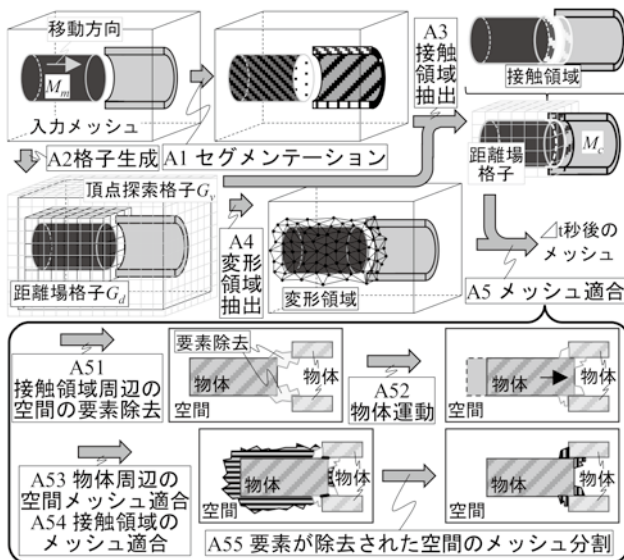


図 2 提案手法の概要

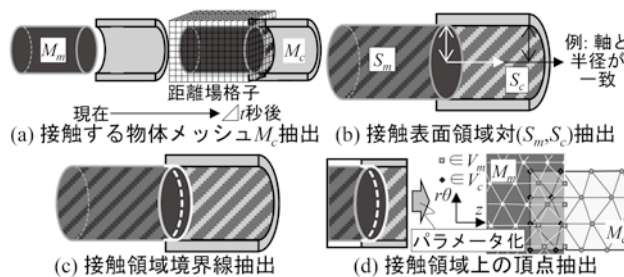


図 3 接触領域抽出概要 (A3)

2.4 接触領域抽出 (A3)

Δt 秒後の物体間の接触領域を抽出するため、まず、 M_m と G_d に物体運動を表す剛体変換を適用し、 G_d の値が0のセルに含まれる頂点を持つ M_m 以外の物体メッシュを M_c として抽出する (図 3(a))。次に、 M_m と M_c のそれぞれから曲面パラメータが一致する接触表面領域対 (S_m, S_c) を抽出する (図 3(b))。そして、相手メッシュ (M_m にとって M_c 、 M_c にとって M_m) のメッシュエッジと交差する S_m 及び S_c の領域境界線を用いて接触領域を囲む境界線 (接触領域境界線) を求める (図 3(c))。その後、図 3(d)に示すように、曲面パラメータ空間における接触領域に対する接触表面領域内頂点の内

外判定処理を用いて、 M_m と M_c のそれぞれにおける、接触領域上の頂点集合 V_m 、 V_c を抽出する。最後に、最初に行った剛体変換の逆変換により、 M_m と G_d を運動前の状態に戻す。

2.5 変形領域抽出 (A4)

既提案法^[3]のメッシュ適合を適用する M_m 周辺の空間メッシュの要素集合(変形領域)を抽出する。変形領域は、 G_v の各セルの M_m 表面からの距離値を、その重心を含む G_d のセルの値として取得し、その距離値が閾値以下のセル集合に登録されているメッシュ頂点を含む要素集合として得る。

2.6 メッシュ適合 (A5)

2.6.1 概要

メッシュ適合処理では、まず接触領域近傍の空間の要素を除去する (A51)。次に、 M_m に剛体変換を適用し (A52)、既提案手法^[3]により、物体周辺の空間メッシュを、頂点移動と局所位相変更操作により、接触領域の表面三角形メッシュを物体運動へ適合する (A53, A54)。最後に、A51で生じた空間をメッシュ分割し (A55)、物体運動に適合した Δt 秒後のメッシュを得る。以下に各処理の詳細を記す。

2.6.2 接触領域周辺の空間の要素除去 (A51)

本手法では、 M_m と M_c が接触した際に空間メッシュの縮退要素の発生を防ぐため、接触領域近傍の空間メッシュ要素を除去する。ここでは V_m 、 V_c 内の頂点及びその1近傍の物体メッシュ表面頂点に接続する空間メッシュのエッジ、三角形、四面体を除去する。また、要素除去で生じた空間の境界メッシュにおいて、 M_m 表面からの距離が閾値以下の頂点とその隣接要素(エッジ、三角形、四面体)を除去する。

2.6.3 物体運動 (A52)・物体周辺の空間メッシュ適合 (A53)

まず、 M_m と G_d に物体運動を表す剛体変換を適用する。次に、変形領域(M_m 表面近傍の空間メッシュの要素集合)に対し、既提案法^[3]による M_m への追従変形と品質改善を行う。

2.6.4 接触領域のメッシュ適合 (A54)

M_m と M_c の接触領域 C の要素整合性を保つため、まず M_m 、 M_c の C 内の頂点の数と位置を一致させ、その後、メッシュ接続性を一致させる。最後に局所メッシュ品質改善を行う。

頂点数と頂点位置の一致処理では、まず、 M_m と M_c の領域境界線の交点 v_c を M_m と M_c 上へ $edge\ split$ により追加する。次に図4(a)のように、 V_m と V_c の各頂点から、互いに相手メッシュ内の最近点となる対応点对を反復的に抽出する(対応点のない頂点を未対応点とする)。そして未対応点以外の一方のメッシュの頂点の位置を、その対応点位置に移動させる。ここでは頂点移動によって要素が裏返らないことを保障するため、まず、接触領域内の頂点を含む各四面体において、その4頂点の全組み合わせで頂点移動を行い、裏返り要素が生じた場合は、その時の移動頂点を移動不可頂点とする。そして、移動不可頂点以外(移動可能頂点)を対応点位置へ移動させる。図4(b)のように、これら移動可能判定と頂点移動を移動可能頂点が無くなるまで繰り返し、頂点位置を両メッシュで一致させる。最後に、図4(c)のように移動不可頂点と未対応点の位置で、相手メッシュに $face/edge\ split$ を適用し、頂点数を両メッシュで一致させる。

メッシュ接続性は、図5に示す $edge\ flipping$ により一致させる。なお、要素の裏返りが生じるなどの理由からどちらのメッシュにおいても $flipping$ 操作が行えない場合は、それらエッジの交点位置でそれぞれ $edge\ split$ を適用する。

最後に段階的ODTスムージング^[2]により接触領域内要素とその近傍要素の品質を改善する。

2.6.5 要素が除去された空間のメッシュ分割 (A55)

2.6.2節の要素除去で生じた空間の表面三角形メッシュに対して制約付きドロネー分割を行い、生成されたメッシュに既提案法^[3]による品質改善を適用する。

3 実行結果

実験に用いた入力メッシュ(頂点数:31,530,四面体数:

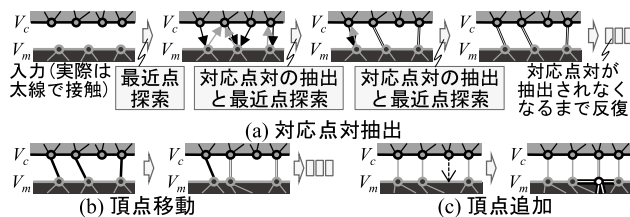


図4 頂点移動と $face/edge\ split$ による頂点位置と頂点数の統一

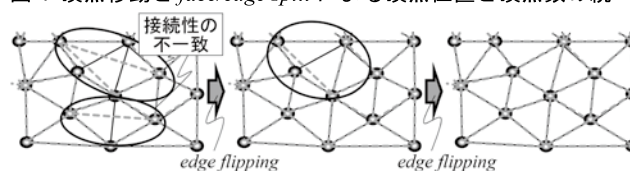


図5 $edge\ flipping$ による接続性の統一

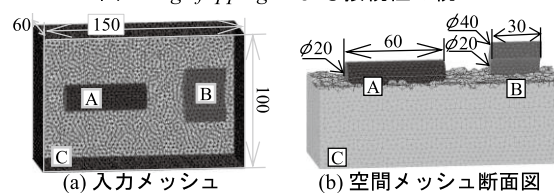
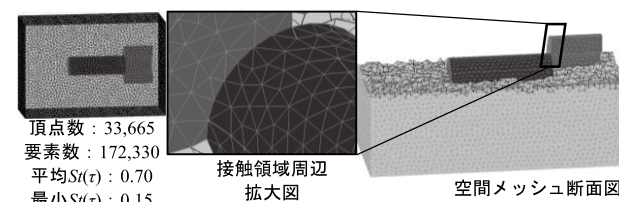
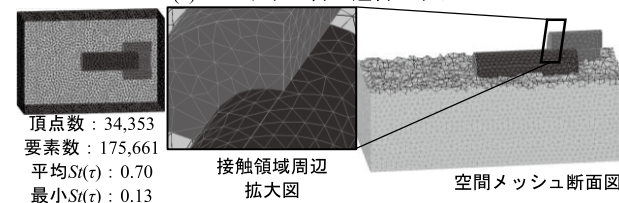


図6 入力メッシュ



(a) 30ステップ目の適合メッシュ



(b) 45ステップ目の適合メッシュ

図7 適用結果

160,791)を図6に示す。入力、直径20mm、長さ60mmの円柱物体(図6, A)と、内径20mm、外径40mm、長さ30mmの管状物体を半分に分断した物体(図6, B)を含む、立方体の空間(図6, C)を分割したメッシュであり、円柱物体を各時間ステップでその軸方向に1mmずつ移動させた。30及び45ステップの結果のメッシュとそのストレッチ $St(\tau)$ (四面体 τ に対し、正四面体で1、縮退した要素で0、裏返り要素で負の値となる要素形状品質評価指標)を図7に示す。45ステップの全メッシュの生成に要した時間はCPU: Core i7 3.00GHz, RAM: 64GBの計算機で313sであり、提案手法により、接触を伴う物体運動に適合した裏返り要素のないメッシュが生成できることを確認した。

4 おわりに

空間と物体が分割された解析用四面体メッシュにおける、接触を伴う物体運動への適合手法を提案した。単純な例題を通して、本手法により、物体運動の各時間ステップにおけるメッシュを効率的に生成できることを確認した。

【参考文献】

- [1] 例えば、C. Dobrzynski, et al., Anisotropic Delaunay Mesh Adaptation for Unsteady Simulation, Proc. of the 17th International Meshing Roundtable, 177-194, (2008).
- [2] 前濱他, パラメータサーベイ解析のための機械部品四面体メッシュの寸法駆動変形, 精密工学会誌, 81(4), pp. 368-375, (2015).
- [3] 前濱他, 空間・移動物体に対する効率的な高品質メッシュ生成法, 2015年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 433-434, (2015).