

接触を伴う物体運動に対する解析用四面体メッシュ生成 - 接触面付近のメッシュの高品質化 -

北海道大学 ○前濱 宏樹, 伊達 宏昭, 金井 理

要旨

本研究では運動を伴う組立製品の構造、電磁、流体解析のための空間と物体の両方を分割した四面体メッシュの生成を目的とする。前報では接触を伴う物体運動へのメッシュ適合手法を提案したが、接触面付近に極度に歪んだ要素が残るという課題があった。本報では、要素形状品質を考慮した接触面における頂点数及び頂点位置の一致処理を導入したメッシュ適合により接触面付近のメッシュの高品質化を行う。

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、現在の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。そこで本研究では前報[2]において、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した。しかし、接触面付近に極度に歪んだ要素が残るという課題が残されていた。本報では、要素形状品質を考慮した接触面における頂点数及び頂点位置の一致処理を導入したメッシュ適合により接触面付近のメッシュの高品質化を行う。

2 四面体メッシュの接触面のメッシュ適合手法

2.1 概要

本研究では、空間と物体の両方を分割した四面体メッシュを対象とし、物体、空間を分割したメッシュをそれぞれ物体メッシュ、空間メッシュとする（各四面体に属する物体固有の番号を付与）。また、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、曲面の定義パラメータは求められているものとする。

接触面のメッシュ適合では物体メッシュの表面が重なり合っている領域（接触領域C）において頂点、エッジ、三角形を一致させる。本研究では、図 2 のように、接触面近傍の空間メッシュの要素を除去し、メッシュ適合を行い、リメッシングにより接触面近傍の空間メッシュを再生成する[2]。そのため、接触面のメッシュ適合においては空間メッシュとの位相的な整合性（頂点、エッジ、三角形の共有）を考慮する必要はないが、Cとその近傍の表面三角形メッシュの要素形状を高品質にしなければならない。

前報[2]の接触面のメッシュ適合の概要を図 3 に示す。ここでは接触する物体メッシュを M_m 、 M_c とし、領域C上の頂点集合を $V_m \in M_m$ 、 $V_c \in M_c$ とする。接触面のメッシュ適合ではまず、 V_m と V_c から対応点対を作成し(A1)、対応点同士で位置が一致するよう頂点移動を行う(A2)。次に、頂点を追加し、頂点数を一致させる(A3)。その後、局所位相変更操作により接続性を一致させ(A4)、最後に段階的 ODT smoothing[3]による品質改善を行う(A5)。前報[2]ではCとその近傍の表面三角形メッシュの要素形状品質が低くなり、極度に歪んだ要素が生成されてしまった。そこで本報では

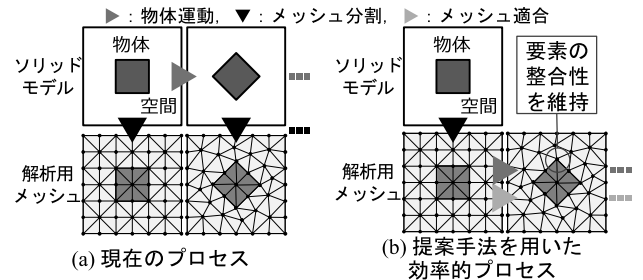


図 1 可動部を含む組立製品の解析

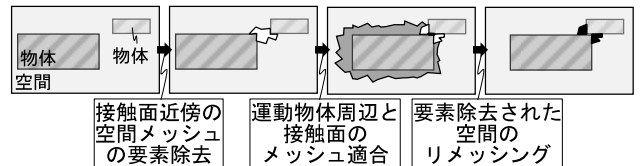


図 2 本研究のメッシュ適合概要

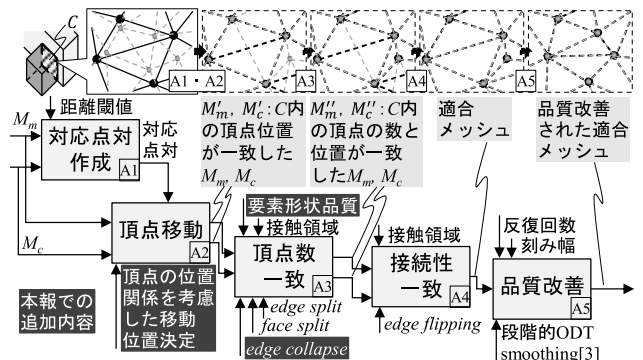


図 3 接触面のメッシュ適合概要

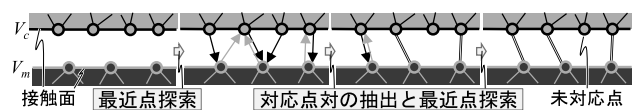


図 4 対応点対作成

頂点移動 (A2) において、入力メッシュの要素形状品質が高いと仮定し、元の位置を可能な限り維持した頂点移動を行う。また、頂点数一致処理 (A3) において要素形状品質を考慮した頂点削除・追加を行うことで、Cとその近傍の要素形状の高品質化を行う (図 3)。A1, A4, A5 の処理は前報[2]と同様であり、A4 と A5 の説明は割愛する。

2.2 対応点対作成 (A1)

対応点対作成は前報[2]の手法と同様の方法で行う。ここでは入力メッシュの要素形状が高品質であることを仮定し、Cにおけるお互いのメッシュの頂点位置を一致させるための頂点の移動量が可能な限り小さくできることが期待される最近点対を対応点対とする。具体的には、図 4 のようにお互いの距離が最小となる頂点対を順次対応点対とし、お互いの距離が閾値以下となる対応点対が見つからなかった頂点を未対応点とする。

2.3 頂点移動 (A2)

作成した対応点对 (一方を*i*とし、その対応点を*c_i*とする) において、対応点同士で位置を一致させるために頂点移動を行う。頂点*j*の位置を*x_j*とすると、前報[2]の手法では頂点*i*を*x_{c_i}*に、あるいは対応点*c_i*を*x_i*に移動していたため、表面の三角形が大きく歪む場合があった。本報では入力メッシュの表面三角形メッシュの要素形状品質が高いと仮定し、元の位置を可能な限り維持するように頂点移動を行う。ここでは、頂点*i*とその対応点*c_i*の移動後の位置*x'_i*及び*x'_{c_i}*を、*x_i*と*x_{c_i}*を通る直線上にあるものとして、 $x'_i(\alpha_i) = x'_{c_i}(\alpha_i) = \alpha_i(x_{c_i} - x_i) + x_i$ と表し、隣接頂点間の差分の変化*E* (式(1))を最小化するパラメータ*α_i*を求める。

$$E = - \sum_{i \in V_m} \sum_{j \in N_i} \left\| (x_j - x_i) - (x'_j(\alpha_j) - x'_i(\alpha_i)) \right\|^2 \quad (1)$$

ここで、*N_i*は*i*の1近傍表面頂点集合である。なお*j*が未対応点等の移動しない頂点の場合は*x'_j*=*x_j*とする。また、対応点对の一方のみが*C*の境界線上にある場合は移動後の位置を境界線上の頂点の位置とする。求めた*α_i*から*x'_i*を求める。

次に頂点移動によって要素が裏返らないことを保証するため、各頂点の移動可能性を判定する。ここではまず、*V_m*と*V_c*の頂点を含む四面体に対し、その4頂点を移動あるいは固定した15パターンの符号付体積を求め、体積が負となった場合は、その時の移動頂点を移動不可頂点とする。そして、移動不可頂点以外の頂点*i*を*x'_i*に移動させる。この移動可能性判定と式(1)の最小化による頂点位置決定をいずれの頂点も移動しなくなるまで繰り返し行い、両メッシュで*C*上の頂点位置を一致させる。

2.4 頂点数一致処理 (A3)

未対応点と移動不可頂点 (それらの頂点集合を*V_u*とする) をメッシュから削除、あるいは相手メッシュ (*M_m*に対し*M_c*、*M_c*に対し*M_m*) に追加して頂点数を一致させる。前報[2]の手法では、単に*x_i* (*i* ∈ *V_u*) での *edgeface split* 操作により相手メッシュ上に頂点を追加していたため、歪んだ要素が生成される場合があった。本報では*V_u*に含まれる頂点を要素形状品質を考慮して *edge collapse* により削除し、削除できなかった頂点を歪んだ要素が生成されないような *edgeface split* 操作により相手メッシュに追加する。なお、本研究では要素形状品質指標としてストレッチ*s(t)* (四面体*t*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) を用いる。

まず*V_u*の頂点を含む四面体内でストレッチが最小の四面体に含まれる頂点*i*を抽出し、*edge collapse* で削除する。ここでは図5のように、頂点*i*に接続する全表面エッジ*e = {i, j}*に対し、*collapse*後の頂点の位置を*x_i*、*x_j*、*e*の中点を*C*の曲面上に投影した点として仮の *collapse* 操作を行い、*collapse* 後の頂点の近傍の四面体の最小ストレッチ*s_{min}*を求める。この*s_{min}*が最大となる *edge collapse* を採用する。なお*i*と*j*の一方のみが*C*の境界線上にあるエッジに対しては、その境界線上の頂点位置を *collapse* 後の頂点位置としたときのみの*s_{min}*を求める。また、接触面形状の近似精度を保つため、*collapse* 後の頂点の接続エッジ中点の接触領域の曲面からの距離が、一定値以上の場合には、その *collapse* は実施せず、次に大きな*s_{min}*を与える *collapse* を採用する。もし最大の*s_{min}*が負の値となる場合は *collapse* を行わない。

最後に削除できなかった頂点*i*を相手メッシュに追加する。ここでは以下の4つの操作を仮想的に行い、操作後の頂点の近傍の最小ストレッチが最大の操作を採用する。

- ① 相手メッシュ上にある*x_i*の最近傍エッジ*e*の中点で *edge split* を行い、*split* で生成された点を*x_i*に移動
- ② 相手メッシュ上にある*x_i*の最近傍エッジ*e*の中点で *edge split* を行い、頂点*i*を*e*の中点位置に移動
- ③ 相手メッシュにおいて*x_i*で *face split*

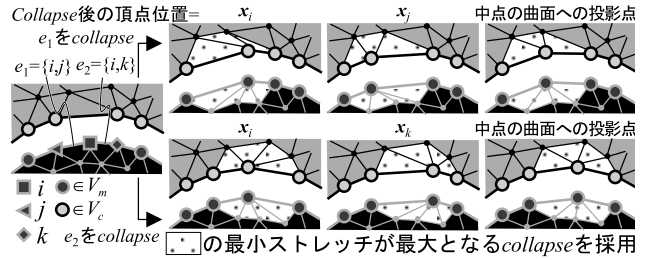


図5 Edge collapse

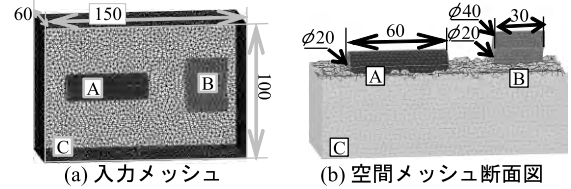


図6 入力メッシュ

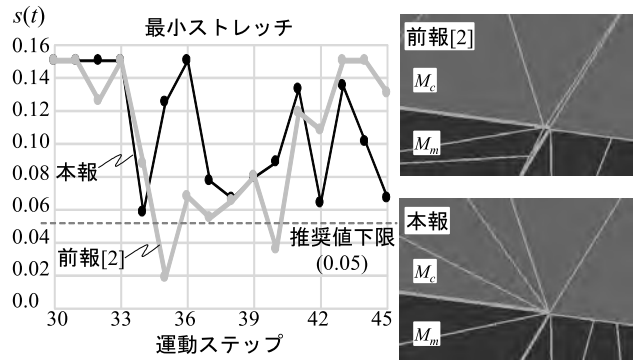


図7 適用結果

- ④ 頂点*i*を相手メッシュ上に投影した際に*i*を含む三角形*f*の重心で *face split* し、*i*を*f*の重心位置に移動

3 実行結果

入力メッシュ (頂点数: 31,530, 四面体数: 160,791) を図6に示す。入力には円柱物体 (図6, A) と管状物体を半分に切断した物体 (図6, B) を含む、直方体の空間 (図6, C) を分割したメッシュであり、円柱物体を各運動ステップでその軸方向に1mmずつ移動させた。物体接触後の前報[2]と本報の手法により生成されたメッシュの最小ストレッチを図7(a)に示す。前報[2]では35ステップと40ステップにおいて最小ストレッチが推奨値の下限以下となったが、本報の提案手法では、全てのステップにおいて最小ストレッチが推奨値の下限以上となった。図7(b)は35ステップ目の接触面近傍であり、前報[2]では非常に歪んだ三角形が見られるが、本報の提案手法ではそのような要素を発生することなくメッシュ適合を行えることを確認した。

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のための要素の高品質化手法を提案した。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いて、極度に歪んだ要素のないメッシュが得られることを確認した。

【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, 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, 2015年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 85-86, (2015).
- [3] 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).