

法線テンソルと領域拡張法による解析用メッシュセグメンテーション

北海道大学 ○前濱 宏樹, 伊達 宏昭, 金井 理

要旨

本報では、解析用四面体メッシュの寸法駆動変形への応用を目的とし、法線テンソルを用いた曲率算出と領域拡張法により、平面、2次曲面(円筒, 円錐, 球)ならびにトーラス面を曲面間の連続性に関わらず認識可能な解析用四面体メッシュ表面のセグメンテーション法を提案する。

1 はじめに

工業製品の機能評価に必要な不可欠な CAE プロセスにおいて、計算コストの高いメッシュ分割の回数を低減することで効率化を図る有限要素解析用メッシュの寸法駆動変形手法[1]が提案されている。これらの技術を応用することで、解析用メッシュを主体とした CAD データに依存しない機械部品の形状設計が実現でき、CAE プロセスの大幅な効率化と解析用メッシュの再利用性の向上が可能となる。解析用メッシュを主体とした機械部品の形状設計では、フィレットの径、ボスの高さ、リブの幅等の様々な寸法値の変更を解析用メッシュにおいて行う必要があり、寸法値の変更を行うには解析用メッシュ表面を各種曲面に正確に分割できるセグメンテーション法が必要となる。メッシュセグメンテーション手法には領域拡張法や階層的クラスタリング等に基づく様々な手法[2]が提案されているが、 C^1 連続な曲面間境界の正確で安定した抽出は困難、あるいは球面・トーラス面が過分割されるといった問題がある。

そこで本報では、機械部品に多く含まれる平面、2次曲面(円筒, 円錐, 球面)ならびにトーラス面を、曲面間の連続性に関わらず認識可能な解析用メッシュセグメンテーション法を提案する。提案手法は、法線テンソルに基づく曲率算出、法線・曲率・主方向に基づく領域拡張法を用いた曲面のシード領域抽出、そしてシード領域に対する厳密な曲面フィッティングにより、解析用メッシュ表面のセグメンテーションを実現する。

2 提案する解析用メッシュセグメンテーション手法

2.1 概要

提案手法では、解析用四面体メッシュ表面を平面、2次曲面(円筒, 円錐, 球面)ならびにトーラス面にセグメンテーションする。2つの2次曲面間、あるいは2次曲面-トーラス面間における C^1 連続な境界抽出には土江らの特徴線抽出手法[3]のように、曲率の符号と主方向の変化の活用が有効である。また、解析用メッシュでは頂点が元の曲面上にほぼ厳密に存在しているため、正確な曲面フィッティングとフィッティング曲面-頂点間距離の厳密な評価により、正確なセグメンテーションが可能である。

以上を踏まえた、提案手法の概要を図1に示す。提案手法では、まず、前処理として二面角評価によるシャープエッジ抽出(A1)と、各頂点に対する法線テンソルに基づく主方向・主曲率算出を行う(A2)。次に、平面・2次曲面の特性を用いた領域拡張法と曲面フィッティングにより、平面, 円筒面, 円錐面, 球面の順に表面領域を抽出する(A3)。そして、残りの表面領域をトーラス面として、トーラス面間を領域拡張法により分割(A4)し、解析用メッシュセグメンテーションを実現する。

2.2 主方向・主曲率算出(A2)

本研究では法線テンソルに基づく主曲率の計算法[3]を用い、領域拡張法のために各三角形に主曲率とガウス曲率、および最小主曲率の主方向を与える。この曲率計算法では、まず各頂点において、法線テンソルを1近傍の三角形の単位法線ベクトルの共分散行列の重み付き和として求め、その固有値解析を行う。法線テンソルの固有値 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ に対応する固有ベクトル e_k ($k = 1, 2, 3$) は、各頂点の法線、

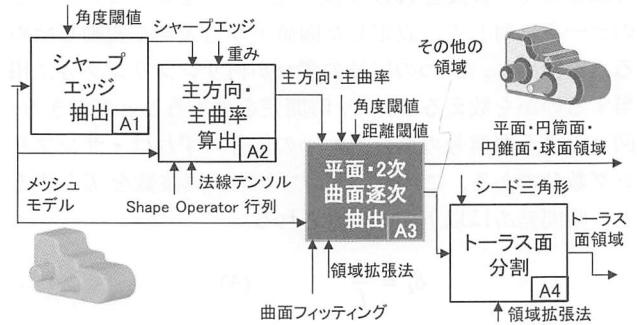


図1 提案手法概要

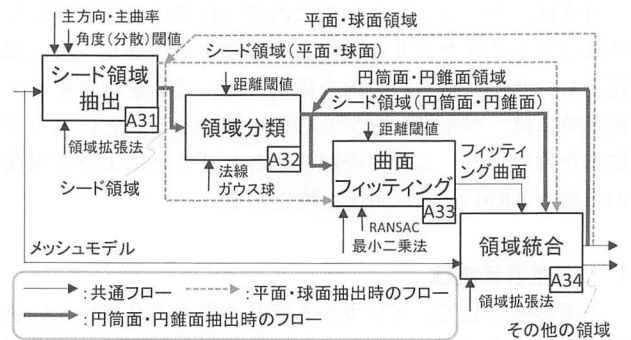


図2 平面・2次曲面逐次抽出法(A3)

最大主曲率の主方向, 最小主曲率の主方向にそれぞれ対応している。次に、得られた固有ベクトルから 2×2 の Shape Operator 行列[3]を求め、その固有値として各頂点の主曲率を得る。各三角形の各曲率と最小主曲率の主方向は、三角形の頂点の各曲率と最小主曲率の主方向の平均を与える。

2.3 平面・2次曲面逐次抽出(A3)

2.3.1 概要

平面・2次曲面逐次抽出手法を図2に示す。本手法は、平面・2次曲面の特性に基づく領域拡張法によるシード領域抽出(A31)、三角形の法線のガウス球への投影によるシード領域分類(A32)、曲面フィッティングと領域拡張法の反復による領域統合(A33, A34)を行う。以上の処理により平面, 円筒面, 円錐面, 球面の順に対応する領域を抽出する。

2.3.2 平面・2次曲面の特性に基づくシード領域抽出(A31)

提案手法では、曲面フィッティングのシード領域となる三角形集合を見つけるため、図3に示される(a)平面上では単位法線ベクトルの分散が0になる、(b)円筒面上では最小主曲率の主方向の分散が0となる、(c)円錐面では母線と最小主曲率の主方向が平行である、(d)球面では最小主曲率の主方向に一貫性がない(球面上では主方向を一意に定めることができない)という特性を用いる。ここで、ある要素(頂点や三角形) e のあるベクトル v の分散 σ_e^2 として式(1)を用いる。

$$\sigma_e^2 = \left(\sum_{i \in N_e} \|v_i - \bar{v}_e\|^2 \right) / |N_e| \quad (1)$$

ここで N_e は要素 e の隣接要素の集合 (e を含む)、 \bar{v}_e は N_e 内の要素 i のあるベクトル v_i の総和を正規化したものである。

提案手法では、上記の平面・2次曲面の特性に基づく領域拡張法を適用し、各曲面フィッティングのシード領域を得る。平面のシード領域抽出においては、単位法線ベクトルの分散がほぼ0となる頂点を2つ以上含む三角形のみを用いた領域拡張法を適用する。円筒面や円錐面のシード領域抽出においては、主方向の分散が閾値以下の三角形をシードとして、主方向のなす角が閾値以下であることと最大主曲率の符号が等しいことを条件に、領域拡張法を適用する。また球面のシード領域抽出においては、各頂点の主方向の差の最大値が閾値以上である三角形をシード領域とする。

2.3.3 法線ガウス球によるシード領域分類 (A32)

抽出したシード領域を円筒面と円錐面に分類するため、まず、ガウス球に領域内の三角形の法線を投影し、その像に対して平面の最小二乗フィッティングを適用する。次に、フィッティング平面がガウス球中心を通過する場合はシード領域を円筒面に、通過しない場合は円錐面に分類する。

2.3.4 曲面フィッティングと領域拡張法による領域統合 (A33, A34)

本手法ではシード領域抽出から領域統合 (A31 から A34) までの一連の流れを平面、円筒面、円錐面、球面の順に適用する。領域統合では、まずシード領域に対し、曲面フィッティングを適用する。次に、得られた曲面からの距離が一定値以下の頂点のみからなる三角形集合を領域拡張法により求める。過分割の少ない高精度な領域を得るため、曲面の再フィッティングと領域拡張法を反復する。なお円錐面では、シード領域が円錐面の母線に沿った形で得られており、精度のよいフィッティングが行えないため、複数の領域を用いた RANSAC によりフィッティングを行う。また球面においてはシード領域が1つの三角形であり、その3頂点の法線の交点を中心とする3頂点を通過する球をフィッティングする。

2.4 トーラス面分割 (A4)

平面・2次曲面逐次抽出 (A3) 後にどの平面・2次曲面領域にも属していない三角形集合をトーラス面領域とし、トーラス面領域の境界を抽出する。トーラス面同士の接続境界の抽出には、ガウス曲率の符号が一致することを領域拡張条件とした領域拡張法を用いる。

これまで得られたトーラス面領域には、図 4(a)に示されるように本来の領域境界を越えて2次曲面として認識されている三角形が存在する。そこで、解析用メッシュでは2次曲面が本来の境界を越えて抽出されたとしても、高々1つの三角形であることを利用し、3頂点がトーラス面上に存在している2次曲面の三角形をそのトーラス面領域の三角形として再分類することで、境界を修正する。

また、平面・2次曲面逐次抽出 (A3) 結果には図 4(b)(c)のようにトーラス面上に微小な2次曲面領域として誤認識された三角形集合が存在する。そこで、対象とするメッシュでは曲面領域が十分な数の三角形を含んでいることを前提とし、図 4 に示されるような、(b)すべての頂点が領域境界上にある領域、(c)特徴点 (領域境界エッジの入射数が3以上の頂点) 以外で鋭角を含む領域 (特徴点以外の頂点で入射する領域境界エッジ間の角度が鋭角である領域) を除去する。ここでは、微小領域(b)(c)を、その領域との領域境界が最も長いトーラス面領域に統合することで除去する。

3 実行結果

図 5 および図 6 に入力メッシュと提案したセグメンテーション法の適用結果を示す。提案手法により C^1 連続で接

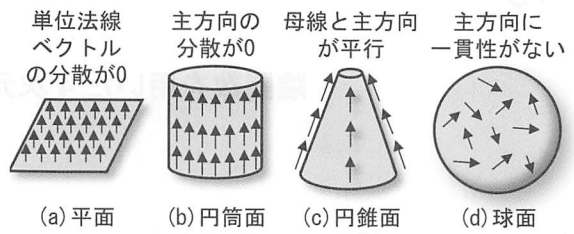


図 3 平面・2次曲面の特性

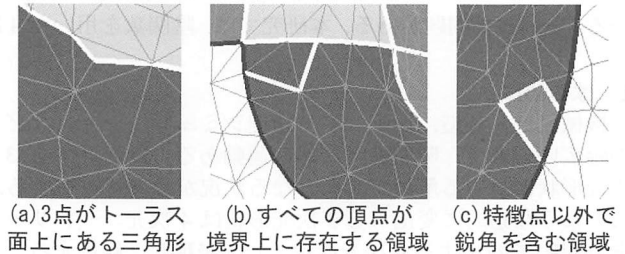


図 4 修正を行う微小領域

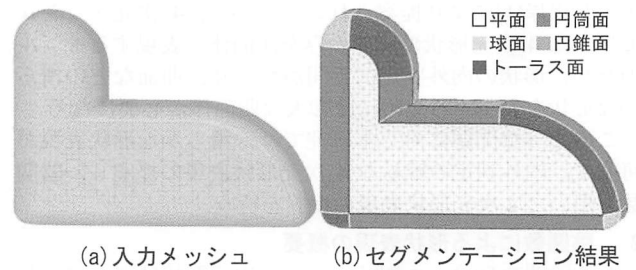


図 5 提案手法適用結果 (面分数 : 10, 122, 計算時間 : 4[s])

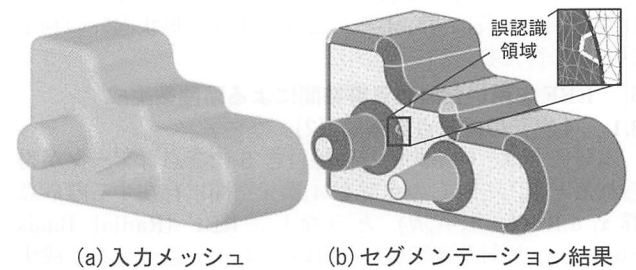


図 6 提案手法適用結果 (面分数 : 20, 032, 計算時間 : 10[s])

続する曲面上の三角形集合が正しく分割されており、面の分類も正しく行われていることがわかる。図 6 に見られるような今回対象としていない微小領域の除去は今後の課題とする。

4 おわりに

本研究では法線テンソルに基づいた主曲率・主方向算出による領域拡張法と、曲面フィッティングによる解析用メッシュのセグメンテーション手法を提案し、本手法を解析用メッシュに適用することで、有効性を確認した。今後は本手法のセグメンテーション結果を用いた寸法駆動変形手法の確立を目指す。

[参考文献]

- [1] 例えば、高野他、空間埋込みを用いた四面体メッシュモデルの寸法駆動変形、精密工学会北海道支部 50 周年記念学術講演会講演論文集, 19-20 (2009).
- [2] 例えば、Geng, C. et al, A Thin-plate CAD Mesh Model Splitting Approach Based on Fitting Primitives, EG UK Theory and Practice of Computer Graphics, 45-50, (2010).
- [3] 土江庄一, 東正毅, 意匠測定データに対する高品質セグメンテーション(第2報)-法線テンソルによる曲面特徴線の抽出-, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 843-844, (2013).