

X線CT計測データからのボイドを含む製品の四面体メッシュ生成 ～局所メッシュ細分化を用いたボイド形状の再現精度向上～

北海道大学 ○東 翔也 伊達 宏昭 金井 理 北海道立総合研究機構工業試験場 田中 大之
要 旨

本研究では、ボイドを含む製品の実形状情報を用いた有限要素解析を目的とした、X線CT計測データからの頑健な四面体メッシュ生成法を提案する。本報告ではメッシュ適合(四面体要素除去とボイド形状近似)に加え、局所メッシュ細分化を行うことでボイド形状の再現精度を向上する手法を提案する。また局所メッシュ細分化の基礎となる四面体分割機能の実装結果を示す。

1. はじめに

近年、工業用X線CTを用いた工業製品の計測技術へ注目が高まりつつある。X線CTによる計測は、従来のレーザ計測や画像計測などとは異なり、製品の表面形状のみならず、内部形状をも計測することが可能である。そのため、X線CT計測データを用いた製品の内部欠陥検出、CADモデルと現物との比較、流体シミュレーション、強度解析、CADモデル生成など、形状計測データの広範囲な活用が可能になってきている。

X線CT計測により製品内部のボイド(鋳巣などの内部欠陥)の形状情報を得ることが可能になり、それに伴い、ボイドを含む製品の実形状を利用したCAEによる有限要素への要求が高まってきている。その解析のためにはX線CT計測データからの解析用四面体メッシュ生成が必要である。そこで本研究では、X線CT計測から得られた表面三角形メッシュからの解析用四面体メッシュ生成を目的とし、複雑なボイドを含む形状に対しても頑健に高品質な四面体メッシュを生成可能な手法を提案する。本報では既提案のメッシュ適合に基づくメッシュ生成法^[1]に、局所メッシュ細分化を導入し、ボイド再現精度を向上させる手法を提案し、基礎となる四面体分割機能の実装結果を示す。

2. メッシュ適合による解析メッシュ生成法^[1]

2.1 概要

本研究で提案する手法の概要を図1に示す。本手法ではX線CT計測で得られたボイドを含む実製品の表面三角形メッシュ M_A^S を入力とする。本アルゴリズムは4つの処理で構成される。はじめに、入力メッシュに対して閉メッシュ化とボイド分離を行う(図1A-1)。次に、分離した製品形状表面メッシュ M_P^S に対して高密度四面体メッシュ M_P^V を生成する(図1A-2)。そして、ボイド表面メッシュ M_{Vi}^S と干渉している四面体要素とボイド内部に存在する四面体要素を M_P^V から除去し、ボイド表面外側近傍に存在する四面体頂点(近似頂点)をボイド表面メッシュ M_{Vi}^S へとフィッティングさせ(メッシュ適合, 図1A-3)、初期四面体メッシュ M_A^V を得る。最後に、 M_A^V に対して ODT (Optimal Delaunay Triangulation) による品質改善^[2]を行う(図1A-4)。

本手法は、ボイドを含まない製品形状表面に対する四面体メッシュさえ生成できれば、四面体要素の除去ならびに頂点の移動のみでボイド形状を復元できるため、ボイドの複雑さによらない頑健な手法であるといえる。

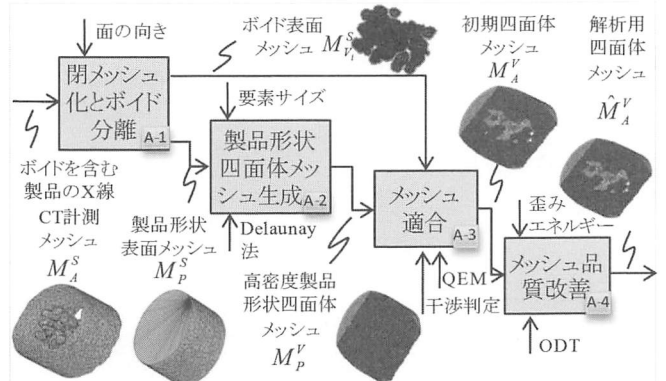


図1: 提案する解析メッシュ生成法の概要

2.2 ボイド分離と製品形状四面体メッシュ生成

(図1A-1, 2)

はじめに、入力三角形メッシュ M_A^S の閉メッシュ化を行う。次に、各閉メッシュをその符号付き体積を用いてボイド表面メッシュ M_{Vi}^S と製品表面メッシュ M_P^S に分離する。その後、得られた製品形状表面メッシュ M_P^S に対して四面体メッシュ分割を行い、製品形状四面体メッシュ M_P^V を生成する。本実装ではこの四面体メッシュ分割に TetGen^[3]を用いた。

2.3 メッシュ適合(図1A-3)

各ボイド表面メッシュ M_{Vi}^S を用いたメッシュ適合(図2)により、以下の処理でボイド形状を M_P^V 内に復元する。まず、ボイドメッシュと干渉する四面体及び、ボイドメッシュ内部に頂点が1つでも存在する四面体を製品形状四面体メッシュ M_P^V から除去する(図2:STEP1)。次に、新たに形状表面に現れた M_P^V の各頂点を近似頂点とし、近似頂点の移動によるボイドメッシュの近似と三角形ひずみを緩和するための Relaxation^[4]を反復して行う(図2:STEP2)。近似頂点の移動は、その頂点の法線方向に、ボイドメッシュから求まる QEM^[5]が最小となるように行われる(図3)。

ここで、各近似頂点の移動量を減らすことにより、製品形状四面体メッシュの自己交差の可能性を低くし、かつ、より高精度にボイド形状を近似(再現)することを目的として、干渉四面体について細分化を行う(図4、詳細は後述)。

2.4 メッシュ品質改善(図1A-4)

生成されたボイドを含む四面体メッシュの品質改善を ODT^[2]

に基づく手法により実施する。この品質改善は ODT エネルギー最小化に基づいており、メッシュの接続性を変えずに、頂点位置のみを移動して行われる。

3. 局所メッシュ細分化

メッシュ適合の STEP2 における近似頂点の移動量を減少させて製品形状四面体メッシュ M_p^v の自己干渉確率の低減化、並びにボイド形状の高精度な再現のため、 M_p^v の干渉四面体について細分化を繰り返し行う。繰り返しの終了条件は近似頂点のボイドを近似するための移動量がある閾値以下になることである。

細分化に際して干渉四面体は、ボイドメッシュ内部にある頂点の数に応じて 3 つに分けられる：頂点がボイドメッシュ内部に 1 つ存在する場合、2 つ存在する場合、3 つ存在する場合。ボイドメッシュ内部の頂点とボイド外部の頂点をつなぐエッジの中点を生成し、これらを新たな近似頂点とすることで近似頂点の移動量の低減化を実現する。この中点生成とそれらの間のエッジ生成により、内部頂点が 1 つの干渉四面体と、内部頂点が 3 つの干渉四面体は四面体と歪んだ三角柱(図 5(a))に分けられる。また、内部頂点が 2 つの干渉四面体は 2 つの歪んだ三角柱(図 5(b))に分けられる。メッシュの細分化はこれらの三角柱を四面体分割することで行われる。

分割に際し、隣接要素との位相的な整合性を考え、歪んだ三角柱の側面の四角形はその隣接三角柱との共通の対角線により分割する。各側面に対して右上から左下、左上から右下の 2 パターンの分割パターンがあるため、三角柱の分割パターンは計 8 パターンとなる。本実装では、あらかじめ三角柱に対する分割規則を決めておき、側面の対角線の状況に応じて分割規則を適用する。

図 6 にテスト四面体に対する細分化のあるパターンの分割結果を示す。図中の小さな黒い三角形は内部頂点を表す。分割規則をあてはめることにより、四面体を適切に分割できた。実計測された製品の四面体メッシュに対して適用することが今後の課題である。

4. おわりに

本報では、ボイドを含む製品の X 線 CT 計測メッシュからの頑健な四面体メッシュ生成手法の提案、及びボイド形状の再現精度向上のための分割手法について述べ、基礎となる分割機能の実装を行った。今後の課題は先述の実計測データへの適用と細分化により生じる歪んだ要素の改善である。

参考文献

- [1] 東 他「メッシュ適合に基づくボイドを含む製品の解析メッシュ生成」 精密工学会北海道支部学術講演会, 79-80 (2011)
- [2] Pierre Alliez, et.al. "Variational tetrahedral meshing", ACM Transactions on Graphics, vol.24, (2005)
- [3] <http://tetgen.berlios.de/>, (2007)
- [4] Leif P. Kobbelt et.al, "A Shrink Wrapping Approach to Remeshing Polygonal Surfaces", EUROGRAPHICS'99, 18(3), (1999)
- [5] Michael Garland et.al. "Surface Simplification using Quadric Error Metrics", in Proc. SIGGRAPH97, (1997)

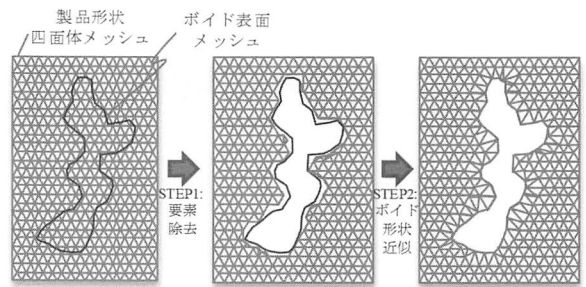


図2：メッシュ適合

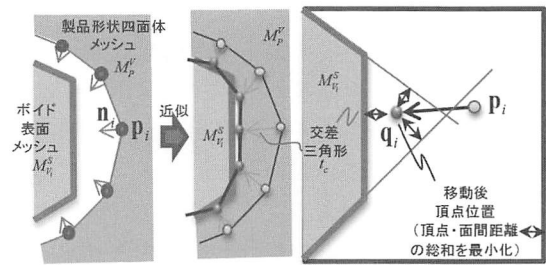


図3：ボイド形状近似のための頂点移動量

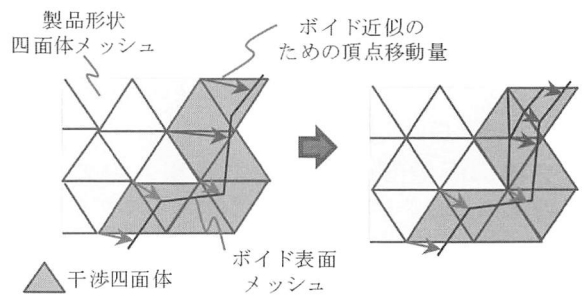
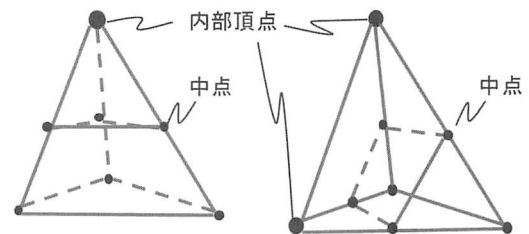
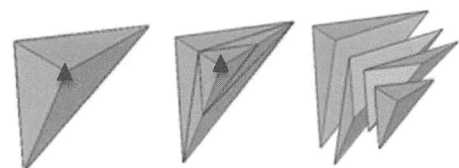


図4：細分化による移動量の低減

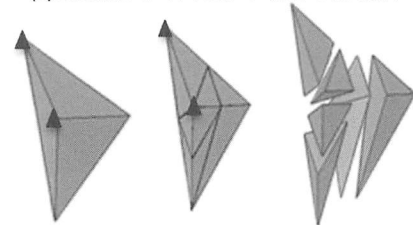


(a) 内部頂点が1つの場合 (b) 内部頂点が2つの場合

図5：内部頂点の存在パターン



(a) 1頂点がボイド内部の場合の分割例



(b) 2頂点がボイド内部の場合の分割例

図6：テスト四面体における細分化の実行例