

(38) VR 技術を用いた三次元メッシュ修正システムの構築

Development of a 3D Mesh Correction System Using Virtual Reality Technology

田中智¹・榎山和男²・陰山聡³

Tanaka Satoshi, Kashiya Kazuo, and Kageyama Akira

抄録: 著者らは既往の研究において、バーチャルリアリティ(VR)技術を使用した対話的な三次元メッシュ修正システムの構築を行ってきた。本システムは OpenGL と CAVElib の2つのプログラムインターフェースを用いて開発しており、メッシュの品質を評価し、コントローラを使用した節点移動によって品質の改善を行うことができる。本研究ではメッシュ修正機能として要素細分化機能を追加した。また、任意形状において、計算領域の幾何学的形状を保護するための節点移動制御データの生成アルゴリズムの開発を行った。例として、インプラント下顎骨のメッシュに対して、制御データを生成し、節点移動機能と要素細分化機能の二つの手法を併用して修正を行い、その有効性を示した。

キーワード: バーチャルリアリティ, CAVE, メッシュ修正

Keywords: Virtual Reality, CAVE, Mesh Correction

1. はじめに

近年、コンピュータ性能の急速な発展により、三次元数値解析が一般的に行われている。しかし、三次元数値解析においては、自動要素生成ソフトにより作成されたメッシュ形状に不具合が見つかった場合、それを適切に修正することは困難となる場合が多い。著者らは、この問題点を解決するために、CAVE に代表される立体視可能な没入型 VR 空間でメッシュの修正を行うシステム^{1) 2)}の構築を行ってきた。

本システムでは、要素の品質評価を行い、VR 空間にメッシュを立体的に表示し、利用者が要素の節点を VR 空間内でコントローラを用いて移動させ、メッシュの品質を改善することが可能である。その際、計算領域の境界上の節点に対して移動方向に制約を与えない場合、節点移動に拘束がないため、メッシュの修正に伴い、計算領域の幾何学的形状が破壊されるおそれがある。そこで既往の研究で高田、榎山らによって、任意柱体形状のメッシュにおける節点移動制御データの生成方法が開発された。この方法により、幾何学的形状を崩さない節点移動が可能となった。しかし、この方法は複雑な形状を含むメッシュに対しては節点移動制御データの生成が不可能という問題点があった。また、本システムはメッシュの修正の方法が節点移動に限られていたため、節点に連なる節点群の数が多い場合などのメッシュの修正が適切に行えないなどの問題があり、別の修正方法として、要素細分化によるメッシュ修正機能の実装が望まれていた。

そこで本研究では、問題を解決するため任意形状に

対しても節点移動制御データを生成できるアルゴリズムの開発と要素細分化機能の実装を行い、複雑な形状を持つメッシュに適用し、その有効性を検討した。

2. 三次元メッシュ修正システムの概要

本システムは、三次元メッシュを VR 空間に立体表示し、利用者がコントローラのボタン操作によりメッシュの品質を修正するものである。要素としては、四面体一次要素を対象としている。

図-1は、本システムを使用する際のフローを示した図である。まず、対象のメッシュデータを読み込み、次式に示す要素の品質評価式³⁾に基づいて、要素の品質評価を行う。

$$Q_m = \frac{\left(\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 L_i^2 \right)^{\frac{3}{2}}}{8.4796V} \quad (1)$$

ここで、式中の、 Q_m は品質評価値、 L_i は四面体を構成する各辺の長さ、 V は四面体の体積である。この品質評価値は、正四面体の時に最小値の 1 となり、歪みが大きくなるにつれて増大するものである。品質評価を行った後に、VR 空間においてメッシュの描画を行う。この際、品質評価値が悪い要素は、要素の辺に色をつけて表示され、利用者はこの情報を基にコントローラを用いてメッシュの修正を行っていく。

メッシュ修正の方法には、1) 節点を移動する方法、2) 要素を細分化する方法、の 2 種類がある。後者の方法は本論文で新たに実装した機能である。

1 : 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27, Tel : 03-3817-1815, E-mail : tanaka@civil.chuo-u.ac.jp)

2 : 正会員 工博 中央大学 教授 理工学部土木工学科

(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27, Tel : 03-3817-1808, E-mail : kaz@civil.chuo-u.ac.jp)

3 : 非会員 理博 神戸大学 教授 大学院工学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

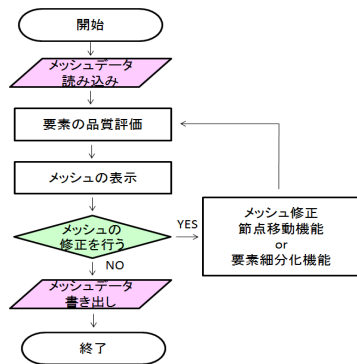


図-1 本システムのフロー図

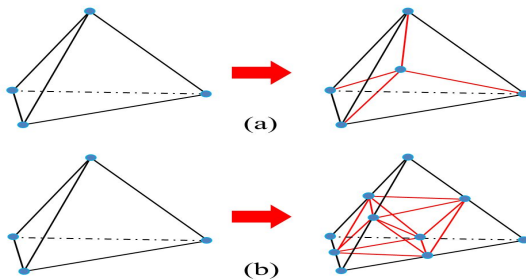


図-2 二つの要素細分化パターン

3. 要素細分化機能について

要素細分化機能を用いてメッシュの修正を行う際は、まず、要素捕捉機能を用いて要素の捕捉を行う。利用者はコントローラから発せられる仮想ビームの先端が目的の要素内部に入るように操作を行い、要素内部でボタンを押すことで、要素の捕捉を行った状態となる。仮想ビームと要素の内外判定は、点位置検索による判定手法⁴⁾を用いている。

要素の細分化機能は、図-2に示すように2種類の方法がある。(a)の場合は、要素の重心に新たな節点を生成するため、細分化に伴い細分化する要素以外のコネクティビティは変化しないので、複数要素を同時に細分化する場合でもアルゴリズム上の工夫なく修正が可能であるが、要素の形状が悪くなるという問題点がある。一方、(b)の場合は、要素の各辺の中点に新たな節点を生成するため、細分化されたメッシュの幾何形状は相似であるが、細分化する要素の周辺の要素のコネクティビティも変化するので、その点の考慮が必要となる。これには、周辺の要素の細分化のパターンが、新たに節点が生じる辺と共通する辺との位置関係によって64パターンに分類できるため、この分類を行い、そして、次に、周辺要素の分割を行うこととした(図-3参照)。この分割パターンは、要素の回転等を考慮すると11パターンに減らすことができるため、最終的にはこのパターンを利用して要素細分化を行った。図

四面体要素を構成する辺は6本
 $2^6=64$ 通りのパターン

共通する辺の数	パターン数	パターン数(回転を考慮)
0辺	1	1
1辺	6	1
2辺	15	2
3辺	20	3
4辺	15	2
5辺	6	1
6辺	1	1
	合計:64	合計:11

図-3 分割の周辺要素パターン数

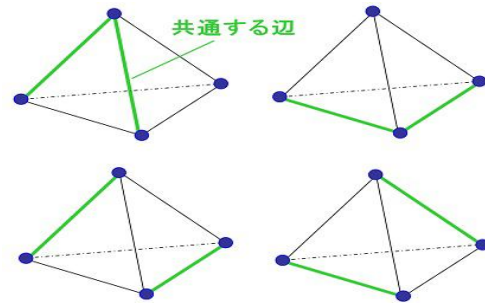


図-4 同一パターンの一例

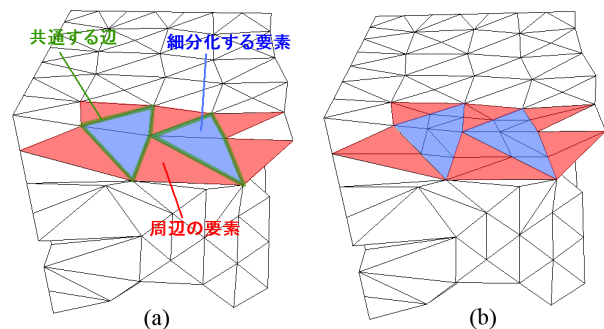


図-5 要素細分化の一例

図-4は共通する辺の数が2辺のパターンの例である。図中の上段の2個のパターンは要素の回転を考慮すると同一のものとなり、同様に下段の2個のパターンも同一のものとなる。周辺要素をパターン分けした後に細分割を行うことで周辺要素にも不具合のない要素細分化が可能となる。図-5に要素細分化の一例を示す。図-5(a)が細分化前、(b)が細分化後を示している。

この要素細分化機能によって、節点に連なる節点群の数が多き部分でも、細分化して新たに節点を生じさせることによって、節点移動に自由度を持たせることができる。

4. 節点移動制御データについて

本節では、任意形状に対して適用可能な、節点移動制御データの生成法について説明する。なお、本論文で議論する節点制御データは任意形状において生成可能であるが、曲面上、稜線上の点の制御には対応して

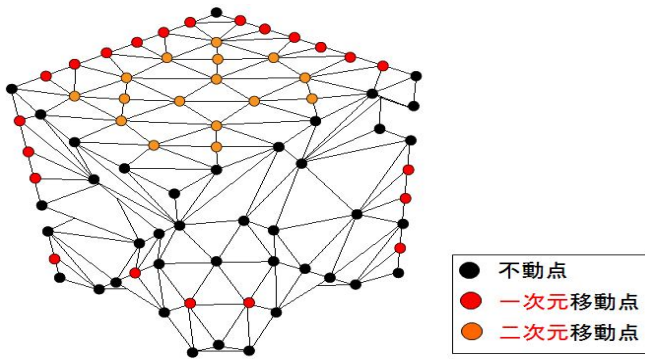


図-6 節点移動制御の一例

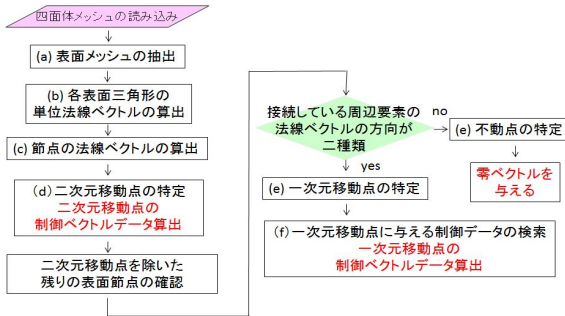


図-7 節点移動制御データの生成フロー

いない。図-6は節点移動制御の一例である。

(1) 節点移動制御データの種類について

節点の移動に伴い、計算領域の幾何学的形状を壊さないように、境界面上の節点移動に制御を施すためのデータ生成を行う。データ生成において、物体境界面上の節点を以下に示す三種類の点に分類し、それぞれに適した節点移動制御データを与える必要がある。

a) 不動点

柱体の頂点の節点や曲面上の節点などがこれにあてはまる。不動点はどの方向に動いても領域の幾何学的形状を破壊してしまうため、完全に固定されるように制御を行う。具体的には節点に対して零ベクトルのデータを与えることによって、節点が動かないように制御する。

b) 一次元移動点

柱体の辺上の節点などがこれにあてはまる。この点は節点が存在している辺上を移動する分には幾何学的形状を破壊せずに移動できるため、辺に対して平行移動のみができるように制御を行う必要がある。具体的には、その節点が存在する辺に平行な単位ベクトルを節点制御データとして与えることで、特定の辺上でしか動かないように制御する。

c) 二次元移動点

柱体の面上などの平面上の節点などがこれにあてはまる。この点は節点が存在している平面上を移動する分には幾何学的形状を破壊しないで移動できるため、平面上のみで移動できるように制御を行う必要がある。具体的にはその節点が存在する平面に対する単位法線ベ

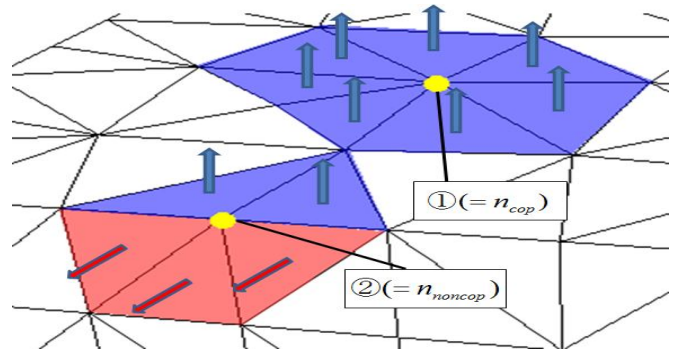


図-8 可動点と法線ベクトルの関係

クトルを節点制御データとして与えることで決められた平面上でしか動かないように制御する。

(2) 節点移動制御データの生成方法について

節点移動制御データの生成方法を図-7のフローチャートに沿って以下に示す。

a) 表面メッシュの抽出

制御をかける必要のある節点は物体境界面上の節点、つまり表面節点のみであるため、まず計算領域表面の表面三角形メッシュの抽出を行う。

b) 各表面三角形の単位法線ベクトルの算出

抽出した表面三角形のそれぞれの単位法線ベクトルを算出する。要素の単位法線ベクトルは表面三角形に対して垂直方向である。

c) 各節点の法線ベクトルの算出

表面三角形における単位法線ベクトルを用いて各節点の法線ベクトルを算出する。節点の法線ベクトルは、周辺要素の平均を用いて次式により算出している⁵⁾。

$$n = \frac{\sum_{c=1}^N n^c}{N} \quad (2)$$

ここで、 n は、節点の法線ベクトルを、 n^c はある節点に接続している各要素の単位法線ベクトルを、 N は節点に接続している要素の総数を示している。

d) 二次元移動点の特定

節点移動制御データが必要な表面上の全節点の中で、まず二次元移動点とそれ以外のものに分類を行う。二次元移動点の判定には、以下の関係を利用した⁵⁾。

$$\|n_{cop}\| \geq \|n_{noncop}\| \quad (3)$$

ここで、 $\|n_{cop}\|$ は同一平面上の節点、つまり二次元移動点の法線ベクトルを示しており、1 という値を必ずとる。また、 $\|n_{noncop}\|$ は、不動点または一次元移動点の節点の法線ベクトルの大きさである。つまり、図-8①のような二次元移動点の節点の法線ベクトルの大きさは必ず 1 となり、それ以外の節点の法線ベクトルの大きさは 1 以下になるということを示している。従って、この性質を用いることで、二次元移動点を特定することができる。また、これによって、平面の単位法線ベクトルを求めることで二次元移動点の節点移動制御データを生成することができる。

e) 一次元移動点、不動点の特定

図-8②の点のように、一次元移動点は、接続して

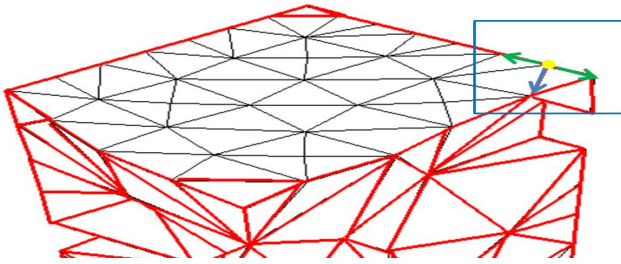


図-9 一次元移動点と不動点のコネクティビティ

いる表面三角形の単位法線ベクトルが二種類のみであるという特徴を持っている。この特徴を利用して、周辺要素の単位法線ベクトルが二種類であれば一次元移動点、三種類以上であれば不動点として分類する。不動点に節点制御データとして零ベクトルを与え、節点制御データを生成する。

f) 一次元移動点に与える制御データの検索

前項において、全ての点を三種類に分けることができた。一次元移動点に与える制御データを生成するため、図-9に示すように一次元移動点と不動点のみのコネクティビティを検出する。図中の赤い線がコネクティビティである。図に示すように一次元移動点に接続されているラインコネクティビティの中で、一組だけ真逆の方向を向いているラインが存在する。そのラインは一次元移動点が動くべき辺に平行なラインとなる。この性質を利用して一次元移動点の制御データを生成し、節点の制御データの完成となる。

5. 適用例

本論文で提案した節点制御データの生成法の妥当性を示すために、インプラント-下顎骨のメッシュ⁹⁾に本アルゴリズムを適用した。節点制御データを本システムに反映させ、VR空間上で節点移動を行った結果、適切な節点制御が行われていることが確認でき、アルゴリズムの妥当性が確認された。

また、要素細分化機能の有用性を確認するため節点移動機能と要素細分化機能の二つの手法を併用して、メッシュの修正を行った。図-10にメッシュをシステムに投影している様子を示す。図-11は、その際のメッシュの修正前後の品質評価値分布図である。図より、品質評価値が20を超えていた8個の要素が修正されただけでなく、品質評価値が8を超える要素もなくなり、メッシュの品質が大幅に改善されたことがわかる。

6. 結論

本論文では、VR技術を用いた三次元メッシュによる修正における問題点の解決のため、任意形状における節点制御データの生成アルゴリズムの開発と要素細分化機能の実装を行った。また、有効性と妥当性を検討するため、インプラント-下顎骨のメッシュに適用し、以下の結論を得た。

1. 新たなアルゴリズムに基づく節点制御データの生

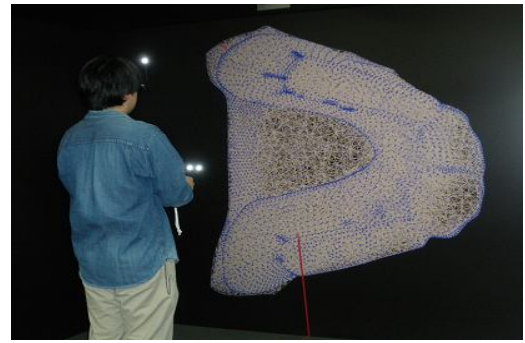


図-10 インプラント-下顎骨メッシュの投影図

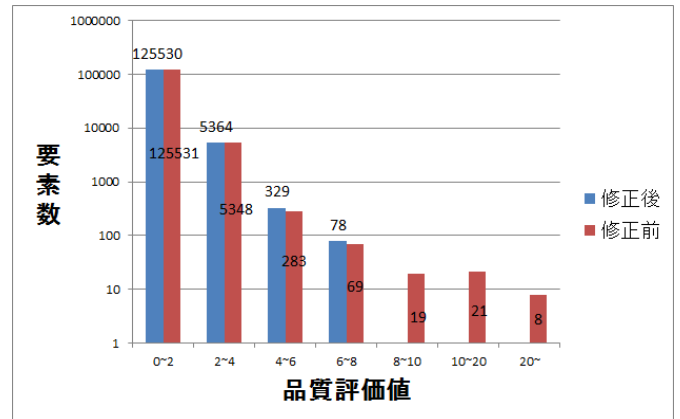


図-11 修正前後の品質評価分布図

成法を、インプラント-下顎骨のメッシュに適用した結果、正しい節点制御データを生成することができ、任意形状で生成できることを確認できた。

- 既存のメッシュ修正システムに要素細分化機能を追加した。その結果、メッシュ修正の選択肢が増え、高品質なメッシュ修正が可能となった。

今後の課題としては、曲面境界上や稜線を認識した、節点制御データの生成方法の確立、本システムのさらなる利便性の向上や有効性の検討などがあげられる。また、今後は土木構造物や地形モデルへの適用を検討している。

参考文献

- 1) 榎山和男, 山崎輔, 陰山聡, 大野暢亮: VR 技術を用いた非構造格子用プリ・ポスト処理システムの構築: 第 25 回数値流体力学シンポジウム, D07-2, 2011 年
- 2) 田中智, 榎山和男: VR 技術を用いた 3 次元メッシュ修正システムの構築: 土木学会全国大会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 (印刷中)。
- 3) Lori A. Freitag, Patric M. Knupp: Tetrahedral mesh improvement via optimization of the element condition number, Int. J. Numer. Methods. Eng., Vol. 53, pp. 1377-1391, 2002.
- 4) 白山晋, 日本計算工学会編: 計算力学レクチャーシリーズ⑧知的可視化: 丸善株式会社, 206p, 2006 年。
- 5) 高田知学, 榎山和男, 林田憲治, 陰山聡, 大野暢亮: バーチャリアリティ技術を用いた有限要素メッシュの対話的修正システムの構築, 応用力学論文集, Vol.15, 2012 年 (印刷中)
- 6) 平野喜一, 長嶋利夫, 松下恭之, 東藤貢: インプラントオーバーデンチャーの 3 次元 FEA, 第 21 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集 08-33, 日本機械学会, pp.624-625, 2008 年。