

(42) VR技術を用いたメッシュ修正システムの構築 -四面体二次要素の実装と利便性の向上-

田中 智¹・檜山 和男²

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)
E-mail: tanaka@civil.chuo-u.ac.jp

²正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp

著者らは既往の研究において、バーチャルリアリティ（VR）技術を用い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イスを用いて開発しており、自動メッシュにより作成された要素の品質を評価し、コントローラ操作により品質の悪い要素の節点を移動させたり、要素を細分化することによって品質の改善を行うことができる。本論文では、要素細分化機能の改良を行い、四面体二次要素への適用を可能とした。また、利便性の向上を目的とし、メッシュの表示機能の改良や計算領域の形状修正に関連する機能の追加を行ない、例題に適用することで、その有効性を示した。

Key Words : Virtual Reality, CAVE, Mesh modification, Finite Element Simulation

1. はじめに

近年、コンピュータ性能の急速な発展により、三次元有限要素解析が一般的に行われている。しかし、三次元解析においては、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、二次元表示媒体を用いて、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⁾の構築を行ってきた。

本システムは、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VR空間内でコントローラを用いて、メッシュの品質を改善することが可能である。本システムは非構造格子である四面体一次要素、四面体二次要素を対象としているが、要素細分化²⁾による修正機能は四面体二次要素には適用可能でなかった。四面体二次要素は、固体解析の分野において頻繁に用いられるため、四面体二次要素に適用可能とすることは重要と言える。また、従来システムの問題として、節点移動機能の利便性に関する問題がある。自動要素生成ソフトでメッシュを作成した場合、入力した形状データが完全に再現されずにメッシュが生成されることがあり、その場合は、計算領域の形状修正を行なう必要がある。しかし、従来システムでは節点移動制御を行っているため、計算領域表面上の節点の動きが拘束されており、形

状修正を行うことが不可能であった。また、節点制御の種別の視覚的な区別がシステム内で行われておらず、表面上の節点にどのような制御がかかっているのか利用者が認識できないなどの問題もあり、節点移動に関連する機能の利便性に問題があった。

そこで、本研究ではシステムの適用性の向上を目的として、要素細分化機能を改良し、四面体二次要素に適用可能とした。また、利便性の向上を目的として、節点制御ベクトルデータ別の節点の色分け機能、四面体二次要素の中間節点の表示/非表示の切り替えを行う機能、節点制御のON/OFFの切り替えを行う機能を実装し、例題に適用することで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、対象とする要素は、図-1に示す非構造格子である4節点四面体一次要素および10節点四面体二次要素である。

まず、対象のメッシュデータを読み込み、要素の品質評価式³⁾に基づいて、要素の品質評価を行う。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

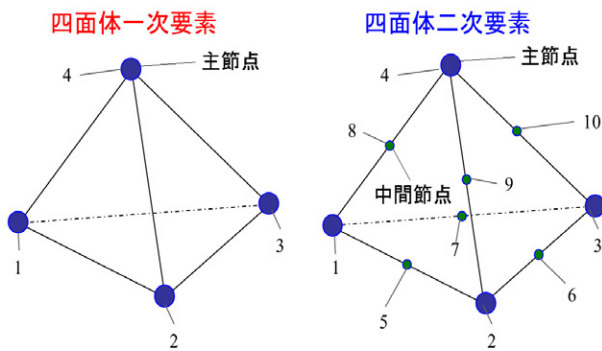


図-1 四面体要素

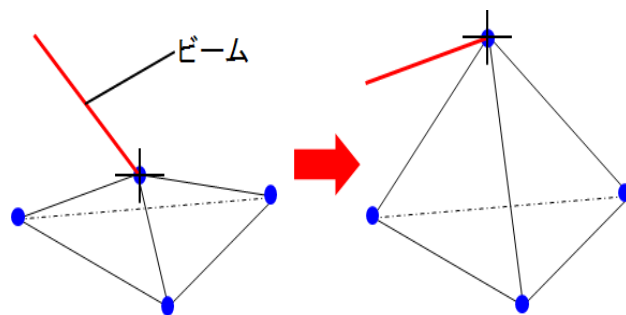
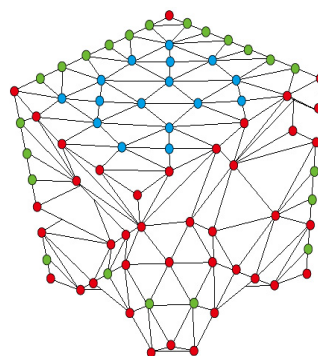


図-2 節点移動機能による修正

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。節点移動法によるメッシュ修正は図-2 のようにコントローラから発せられるビームの先端を修正を行う節点にあわせてボタン操作による捕捉を行い、移動させることによって修正するものである。この際、計算領域の幾何学的形状の破壊を防止するために、図-3 に示すように、計算領域表面上の節点を 3 種類(不動点、一次元移動点、二次元移動点)に分類して、節点制御ベクトルデータを用いて、節点の動きに制限をかけている。詳細については参考文献¹²⁾を参照されたい。なお、節点移動法を四面体二次要素に適用する場合は、要素の頂点の主節点のみを移動させ、辺上の中間節点の座標位置は補間により決定する。要素の細分化機能は、図-4 に示すように 2 種類の方法がある。(a) は要素の重心に新たな節点を生成して細分化を行うパターン、(b) は要素の各辺の中点に新たな節点を生成して細分化するパターンとなっている。しかし、これまでは、四面体二次要素においては適用可能でなかったため、本論文にて改良を行った。



節点の種類	内部の数値
● 不動点	0
● 一次元移動点	1
● 二次元移動点	2
領域内の点	3
中間節点	4

図-3 節点制御例とシステム内部の変数の対応

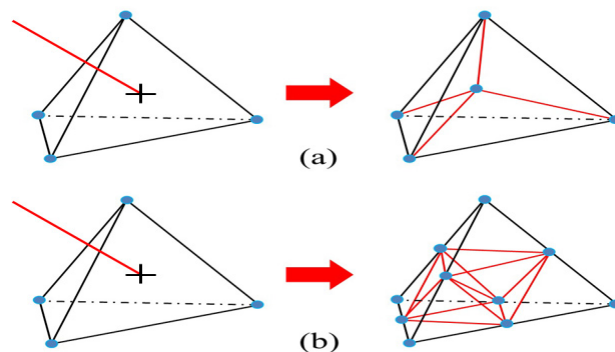


図-4 二種類の細分割パターン

3. 四面体二次要素の実装

(1) 要素捕捉機能の改良について

利用者は細分化を行う要素を選択する場合、コントローラから発するビーム先端をその要素内に移動させてその位置を決定する。この際、メッシュの全要素に対して決定した点がどの要素内に包含されているかどうかの内外判定を行う必要があるが、その方法には一般化座標に基づく方法⁴⁾による判定手法を採用している。この判定方法を四面体二次要素に適用させるには、二次要素の主節点のみを用いることにより対応可能となる。

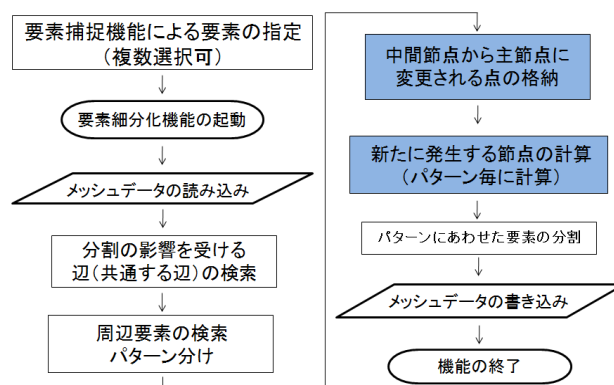


図-5 要素細分化機能のアルゴリズム

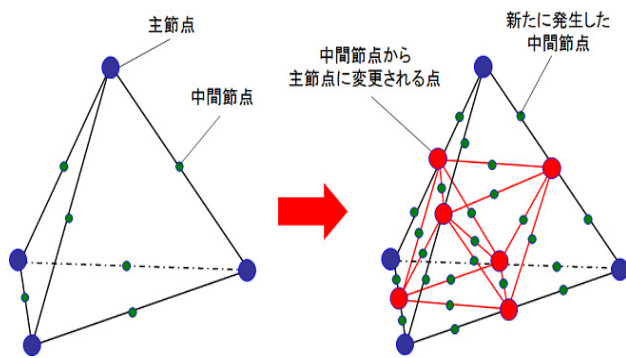


図-6 中間節点から主節点に変更される事例

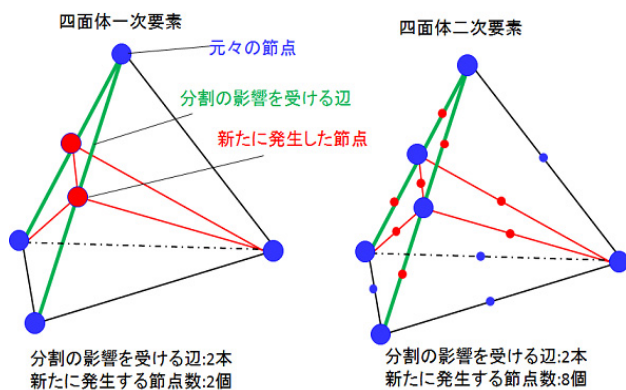


図-7 新たに発生する節点

(2) 要素細分化機能の改良について

要素細分化機能は2通りの細分化パターンを有しているが、図-4(a)のパターンの実装に関しては、四面体一次要素の場合とアルゴリズムに大きな変更はない。図-4(b)の要素細分化アルゴリズムは指定した要素を要素の中点を利用して細分化し、隣接する要素もコネクティビティに不具合が出ないように細分化を行うものである。詳細については参考文献²⁾を参照されたい。しかし、四面体一次要素で用いられていたアルゴリズムをそのまま適用することはできないため、アルゴリズムの改良を行った。図-5は改良後のアルゴリズムを示したフローチャートである。具体的な変更点は、フローチャート上で色を付けている部分であり、以下にその詳細を述べる。

第一の変更点として、要素細分化に伴って中間節点から主節点に変更される節点に対する処理の追加が挙げられる。図-4(b)の細分化パターンは要素の中点を利用して細分化を行うパターンのため、図-6に示すように主節点を発生させる位置と元の要素の中間節点の位置が重なってしまう。そのため、元の要素の中間節点を主節点として扱うことで新たに主節点を発生させずに細分化を行うことが可能となる。しかし、メッシュを構成する各節点はシステム内で区別を行うために節点の種類を示す0~4の数値を変数として持っているため、数値の変更の

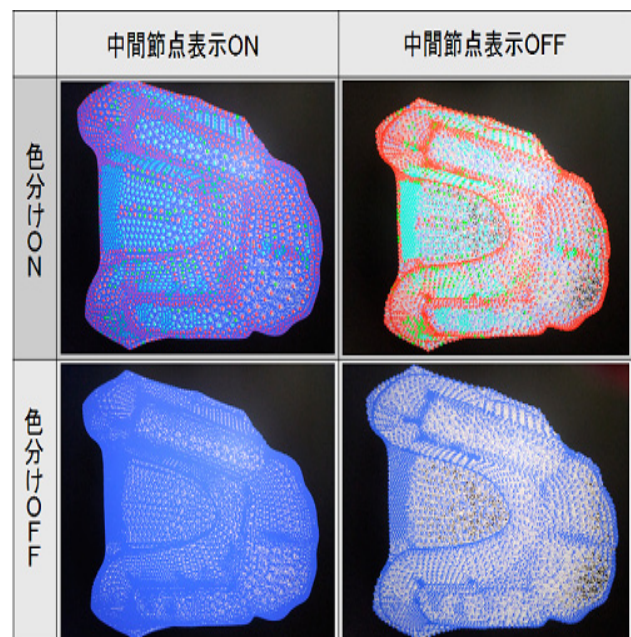


図-8 インプラント-下顎骨メッシュの表示

処理を追加しなくてはならない。具体的には、図-3に示すように、主節点には節点制御に従って0~3の数値が、中間節点には4の数値が与えられているため、要素細分化に伴って、中間節点から主節点に変更される点に関しては数値を4から3に変更を行う必要がある。そのため周辺要素のパターン毎に該当する点の変数の数値を変更する処理を加えている。

第二の変更点として、新たに生成される節点の数・座標の計算方法の変更があげられる。四面体一次要素の細分化を行う場合、新たに節点が発生する場所は分割の影響を受ける辺上のみであり、尚且つ、発生する節点の個数は影響を受ける辺の数と完全に一致する。そのため、影響を受ける辺の中点を計算することで容易に節点の座標、個数の計算を行うことができた。それに対し、四面体二次要素の場合は図-7のように発生する節点の位置は影響する辺上のみではない。これに伴い、新たに発生する節点の個数も分割の影響を受ける辺の数と一致しなくなるため、節点の個数と座標の計算方法を変更する必要がある。そのため、本アルゴリズムではパターン毎に節点を再計算し、その後、新たに計算された節点を用いて要素の細分化を行うこととした。

以上の改良により、四面体二次要素において、要素細分化機能による修正が可能となる。

4. システムの利便性の向上とその適用例

本論文では、システムの利便性の向上のため、システムの機能の改良を行った。具体的には節点の表示を行う

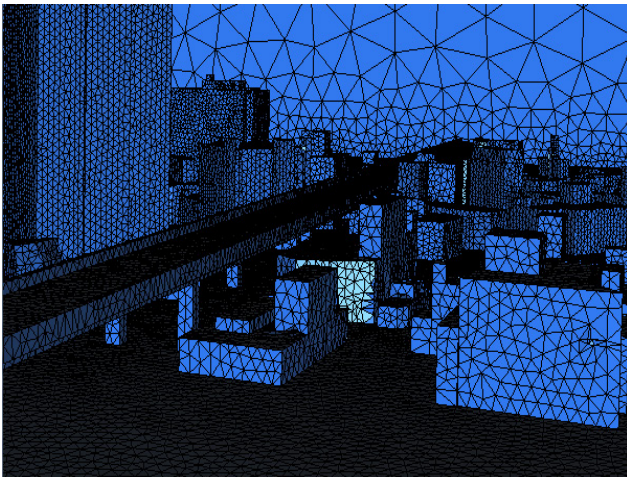


図-9 都市モデルのメッシュ

際の節点移動制御データ別の色分けの機能，中間節点の表示方法および節点制御のON/OFFを切り替える機能の実装を試みた。

(1) インプラント-下顎骨メッシュ

図-8は四面体二次要素である，インプラント-下顎骨⁹⁾のメッシュにおいて，各表示機能をON/OFFしたときのメッシュ表示の状態を比較した表である。なお，本システムは不動点を赤色，一次元移動点を緑色，二次元移動点を水色，制限のかかっていない点，中間節点を青色として表示を行っている。

本システムの利便性の向上を検討するため，メッシュに対して節点移動法による修正を行い，色分けの有無によって，修正時間を比較した。なお，品質評価値の閾値は10とし，それ以上の値を持つ要素の修正を行った。その結果，色分け無しでは8分40秒，色分け有りでは7分55秒を修正に要した。このことから修正時間を約10%弱短縮できたことがわかり，利便性の向上を確認することができた。これは不動点が視覚的に表示されるようになったことで，不動点に対して節点移動を試みるものがなくなり，節点移動機能の試行回数が減少したことが要因である。

(2) 都市モデルのメッシュ

節点制御のON/OFFを切り替える機能の有効性を検証するため，図-9に示す都市モデルの表面メッシュの形状修正を行った。図-10(左)は，建物基部と地面との接合部を示すが，図より接合部が雪が積もったような形になっているため，本システムを用いて形状の修正を行った。修正を行った結果が図-10(右)である。節点制御の切り替えが可能となったことによって，計算領域形状の修正が必要な例題にも対応可能となった。

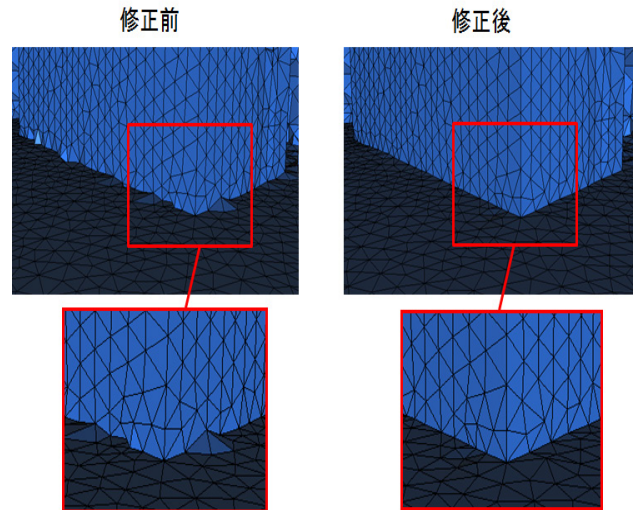


図-10 メッシュ形状の修正前後の比較

5. おわりに

本論文では，VR技術を用いたメッシュ修正システムの適用性，利便性の向上のため，要素細分化の機能の四面体二次要素の実装と，システムの機能の改良を行い，以下の結論を得た。

- ・ 要素細分化機能を四面体二次要素に対して適用可能としたことで，システムの適用性が向上した。
- ・ 節点の色分け機能を実装した結果，修正時間の短縮が確認でき，システムの利便性の向上が示された。
- ・ 節点制御のON/OFFが可能となったことで計算領域の形状修正が必要な例題にも対応が可能となった。

今後は，実際問題への適用によるシステムの有効性の確認を行う予定である。

参考文献

- 1) 高田知学，榎山和男，林田憲治，陰山聡，大野暢亮：バーチャル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, I 217-I 225, 2012.
- 2) 田中智，榎山和男，陰山聡：VR 技術を用いた三次元メッシュ修正システムの構築，土木情報学シンポジウム講演集，土木学会，Vol.37, pp.139-142, 2012.
- 3) L.A.Freitag , P.M.Knupp: Tetrahedral mesh improvement via optimization of the element condition number, Int.J.Number. 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.
- 5) 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.