

E-07

## 多面型 VR 装置を用いた有限要素法メッシュの対話的修正手法の開発 Interactive FEM Mesh Improvement with CAVE-type VR System

林田 憲治<sup>1</sup>      大野 暢亮<sup>2</sup>      陰山 聡<sup>3</sup>      樫山 和男<sup>4</sup>  
Kenji Hayashida   Nobuaki Ohno   Akira Kageyama   Kazuo Kashiya

### 1. 序論

有限要素法は理工学のような様々な分野において広く使われている数値解析手法の 1 つである。計算領域を多数の非構造格子（要素=メッシュ）に分けることで、複雑な空間形状を持つ問題にも対応できることがこの手法の特徴である。その際、メッシュの品質が計算の精度や収束性を決める重要な要因となる。工学分野においては、有限要素法メッシュは自動生成アルゴリズムに従って計算機で生成される場合が多いが、今の所、完璧な自動生成アルゴリズムは存在しないため、実際には計算機で生成されたメッシュを人間が目で見ると修正する操作が必要になる。メッシュが 2 次元の場合にはこのようなメッシュの修正は比較的容易であり、マウスを使って修正する PC 用のソフトウェアが広く使われているが、3 次元メッシュの場合にはそのような対話的な修正を PC を使って効率的に行うことは難しい。3 次元メッシュを PC の 2 次元モニタに映しても、その立体構造を正確に把握できないからである。そこで我々は、バーチャリアリティ（VR）技術を用いて 3 次元メッシュを 3 次元的に表示し、その中に文字通り体ごと没入して、メッシュを対話的に修正する手法を開発した。様々な方式の VR 装置の中でも、最も高い没入感を得られる CAVE と呼ばれる VR 装置を用いた。

### 2. CAVE について

地球シミュレータセンター（ESC）にある CAVE の中心部は 1 辺が 3 m の立方体の部屋である。部屋の正面、右、左の壁面、及び床は全てスクリーンになっている。**Fig.1** に CAVE の外観を示す。壁面スクリーンには背後から、床面には天井からステレオプロジェクターで映像が投影される。体験者は立体眼鏡を着け、ワンドと呼ばれるコントローラーを手に持って部屋の中に立つ。CAVE にはトラッキングシステムが組み込まれており、立体眼鏡やワンドの位置と方向をリアルタイムで検出する。これらのデータを利用して、CAVE システムはスクリーンに映し出す射影計算を更新する。つまり、体験者が歩き回っても、しゃがみ込んだり、周りを見渡してみても、スクリーンに投影される画像が自動的に更新されるため、常にそこから見えるべき景色が見える。ワンドには 3 つのボタンが付いており、このボタンを利用して体験者は CAVE 内部に立ったまま、仮想現実世界をリアルタイムで対話的に操作できる。

1 九州大学、Kyushu University

2 海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター、Earth Simulator Center, JAMSTEC

3 神戸大学、Kobe University

4 中央大学、Chuo University



Fig.1 ESC に設置されている CAVE の外観

### 3. 方法

CAVE のハードウェアとの API には、CAVE ライブラリ（CAVE Lib）を利用する。CAVE Lib は、必要なプロセス・スレッドの作成、スクリーンどうしの映像を滑らかにつなげることで、体験者の視点位置からの適切な射影変換の実行、ステレオ表示に必要なダブルバッファの切り替え等を自動的に処理してくれるライブラリである。CAVE 空間にメッシュを表示させるために我々は OpenGL を用いた。今回我々が開発したプログラムは、鳥山等によって開発されたプログラム[1]をさらに発展させたもので、以下の機能を持つ。

（1）メッシュ自動生成ソフトにより生成された四面体メッシュの座標データ、結合情報等を読み込む。

（2）各メッシュの歪みの大きさを、品質評価式を用いて定量的に評価し、歪みの大きなメッシュは四面体の辺を赤で、メッシュの体積が負の場合は辺を緑で、それ以外のメッシュは辺を白で表示する。節点は青い点で表示する。

（3）ワンドから仮想的に出ているビームの先端を四面体の節点に近づけた状態でボタンを押すことで、その節点を仮想的につかみ、任意の方向にずらすことができる。

以上の基本的な機能に加え、より使いやすくするために以下の補助的な機能を開発した。

（4）全体を表示させるか、歪みの大きなメッシュ及び体積が負のメッシュのみを表示させるかを切り替える機能。

（5）ビームの先端から重心が一定距離内にあるメッシュだけを表示させるクリッピング機能。

（6）プログラム起動中に表示倍率の変更ができる機能。

以上の機能を用いて、メッシュ 1 つ 1 つに対し、節点位置を対話的に調整することで、初期入力メッシュの歪みを修正することができる。

## 4. 応用例

このプログラムを様々な 3 次元メッシュに適用し、その有効性を確認した。以下ではそのうちの 1 つ、日本橋周辺の一部を 329162 個の四面体要素に分割したサンプルデータに適用した例を示す。各メッシュの品質評価には、値が小さい（1 に近い）ほど正四面体に近く、歪みが大きいほど値が大きくなる評価式 [2]を用いた。Fig.2-1 に自動メッシュ生成プログラムで生成された修正前のメッシュを CAVE で表示した様子を示す。Fig.2-2 は同じアングルで歪みの大きなメッシュのみを表示させた様子である。Fig.3 にクリッピング機能を使用しながら修正している様子を示す。Fig.4 に修正前後の要素品質分布を示す。修正前には品質評価値が 50 以上の歪みの大きな要素が 62 個あったものを、10 分ほどで 0 にすることができた。

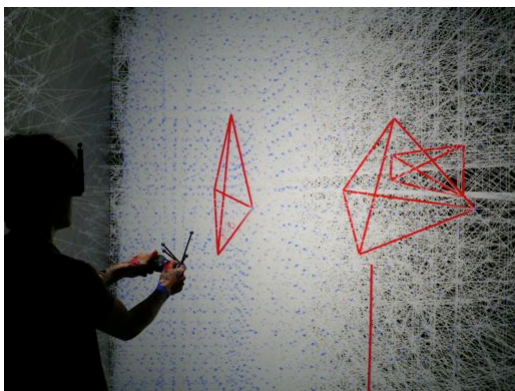


Fig. 2-1 サンプルデータを CAVE に映した様子

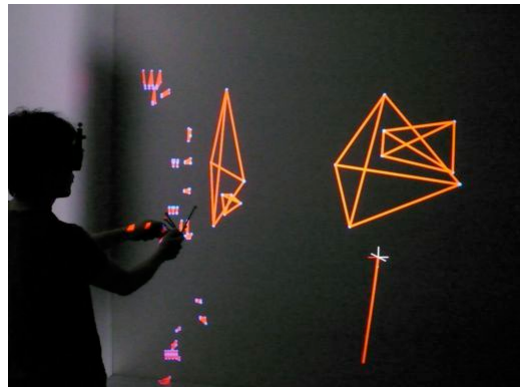


Fig. 2-2 歪みの大きなメッシュのみを表示させた様子

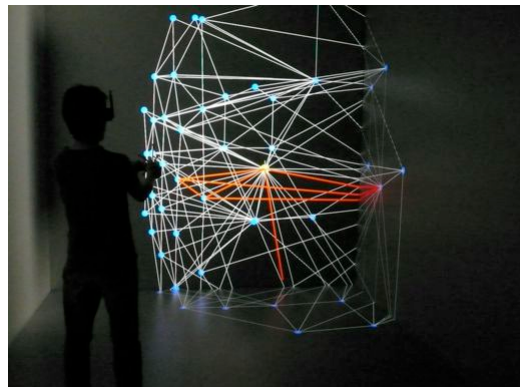


Fig. 3 修正している様子

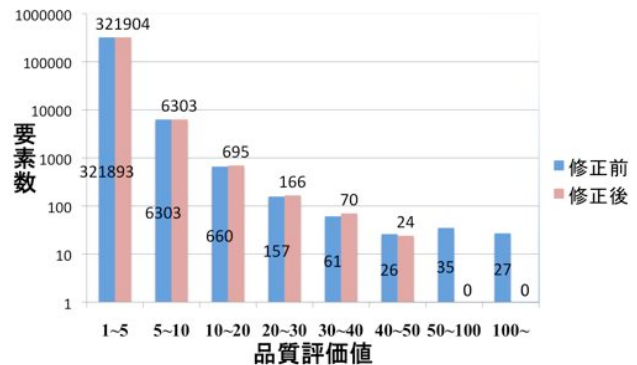


Fig. 4 修正前後の要素品質分布

## 5. まとめ

自動メッシュ生成プログラムによって作られた 3 次元有限要素法メッシュを、CAVE 型 VR 装置を使って対話的に修正するソフトウェアを開発した。

仮想的にビームの先端で節点をつかみ、CAVE の VR 空間内で動かすことで節点の座標値を変更することができる。その他に、クリッピング機能や歪みの大きなメッシュのみを表示させることによって、要素数が多くても対応することができる機能を開発した。

応用例として、日本橋周辺の一部を 329162 個の四面体要素に分割したデータに適用した。特に歪みの大きな要素 62 個を 10 分ほどで全て修正することができた。

今後の課題は以下の通りである：

- (1) プログラムの高速化
- (2) より使いやすいように改良
- (3) メッシュ修正効果の定量的確認手法の開発

このうち (1) の課題については、CAVE のハードウェアに大きく依存する部分が多いため大幅な改善は難しいが、可能な限りプログラムの最適化を施していきたい。次に

(2) については、新しい機能の追加と、全ての機能を対話的に操作できる使い易い操作メニューを開発することで解決する。最後に (3) については、解析解のあるデータにこのプログラムを適用し、修正前後での精度の違いを比較することで、有用性を確認する予定である。

## 参考文献

- [1]鳥山 雄司, “多面型 VR 装置を用いた有限要素法メッシュの対話的修正手法” 九州大学 総合理工学府 修士論文 (2009)
- [2]Lori A. Freitag and Patric M. Knupp, “Tetrahedral mesh improvement via optimization of the element conditionnumber” Int. J. Numer. Meth. Engng, (2002), pp.1377-1391, vol.53