

VR 技術を用いた非構造格子に基づく 流れの対話的可視化システムの構築

山崎輔¹ 檜山和夫² 陰山聡³ 大野暢亮⁴

¹中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 ²中央大学理工学部土木工学科

³神戸大学大学院 ⁴(独)海洋研究開発機構

1. はじめに

近年、様々な流れ現象の予測および把握のために、三次元数値計算が行われている。そして、この計算結果の三次元的構造を可視化により正確に把握するためにVR (Virtual Reality) 技術が利用され始めている。現在、VR装置の形態として、CAVE (CAVE Automatic Virtual Reality Environment) に代表される没入型VR環境が注目され、多くのソフトウェアが開発されている。その中で地球シミュレータセンター高度計算表現法グループは数値解析結果から観察者視点の可視化データをリアルタイムで生成し、かつ対話的な可視化を実現することが可能なソフトウェアであるVFIVE¹⁾を開発した。しかしVFIVEで非構造格子に基づくシミュレーション結果を可視化する際、別途可視化用のボクセル型データに変換する必要がある為、複雑形状を有する問題の場合には、領域形状を正確に考慮した可視化を行うことは困難である。

そこで本研究では、VFIVEを基に、四面体要素に基づく非構造格子に対応した可視化システムの構築を行った。また、非構造格子に基づく有限要素法により解析された気流解析の例を通じて可視化処理における計算時間と計算精度についてVFIVEとの比較を行い、本可視化システムの有効性を検討した。

2. 可視化システムの構築

本可視化システムはCAVEを構成する基本ライブラリであるCAVEライブラリとOpenGLにより構成されている。図1は本可視化システムにおける可視化処理工程を示したものである。本可視化システムは入力データの読み込み後、描画スレッドと計算スレッドに分かれて計算を行っている。計算スレッドにおける可視化処理工程を以下に示す。

2-1. 観察者の位置の取得

本可視化システムは、CAVEライブラリを使用することで、液晶シャッター眼鏡、及びコントローラに装着されているモーショントラッキングマーカーの位置情報から、観察者の視点情報、位置情報をリアルタイムに取得している。取得したこれらの数値データは、可視化処理を行う際の投影位置に用いられる。同時に、観察者の使用するコントローラの操作情報を取得することで、VR空間内を自由に移動する事が可能となっている。

2-2. 可視化機能の選択

本可視化システムにおける可視化機能は流線の表示機能やベクトルの表示といったベクトル場の表示機能と、等値面分布やボリュームレンダリングといったスカラー場の表示機能の二つに大別され、観察者がシミュレーション結果を直観的に理解し易いように表示するために、VRの構成要素である立体感や対話性、没入感等の特徴を利用した様々な可視化手法を持つ。図2はVR空間に没入した観察者が可視化機能を選択している様子を示したものである。コントローラを操作することにより、VR空間上に表示されたインターフェイスから対話的に可視化機能を選択することが可能となっている。

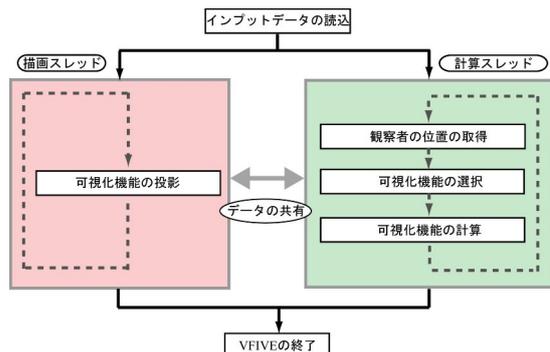


図1 可視化処理工程

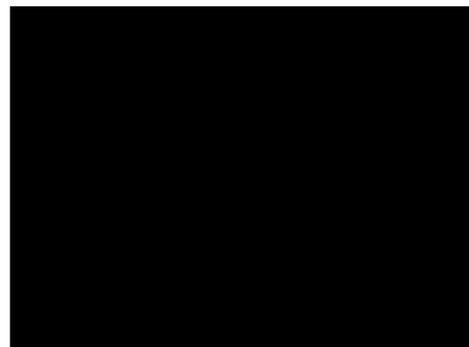


図2 可視化機能の選択

2-3. 可視化機能の計算

ベクトル場及びスカラー場の可視化において、観察者が選択した可視化機能を表示する際、指定した位置（指定点）におけるベクトル値及びスカラー値を非構造格子の節点値（入力データ）を用いた補間によりリアルタイムで算出する必要がある。しかし、非構造格子において指定点を含む要素を検索する場合、非構造格子の全ての要素に対して検索を行うと処理に多大な時間を費やし、高速に計算を行うことが困難である。そのため本可視化システムでは要素の検索から指定点における数値の算出における処理を高速に行うため、以下に示す処理に従い、計算処理の高速化を行った。

2-3-1. 直前に指定点が存在した要素の検索

観察者が指定した可視化機能の表示を行う際、観察者が指定する座標、或いは流速に応じて移動した指定点の座標は、その直前に指定点が存在した位置、或いはその近傍の座標である可能性が高くなることが考えられる。そのため本可視化システムでは、指定点を含む要素を検索する際、まずその指定点の直前に存在した要素を検索する事で要素の検索の効率化を行う。

2-3-2. 分割領域の検索

上記の処理において、直前に指定点が存在した要素が指定点を含みなかった場合、バケット法に基づく分割領域の検索を行う。分割領域データはボクセル型の構造格子により構成されており、領域内に存在する要素データを有するものである。分割領域は各座標軸において領域内部に存在する節点数が同数になるように作成されており、この領域分割データを基に、指定点がどの領域内にあるかの検索を行う。領域の検索は座標軸毎に座標の大小を比較することで高速に行うことが可能である。

2-3-3. 計算座標系に基づく要素検索

指定点を含む領域が判明した後、指定点とその領域内のどの要素に含まれるかを検索し、補間する。要素の検索には計算座標系に基づく要素検索²⁾を採用した。本手法は指定点を実際の座標系 (x, y, z) （図3左参照）から要素毎に構成される簡単な計算座標系 (ξ, η, ζ) （図3右参照）に写像することで簡単な計算式で要素検索を行う事ができる。計算座標系における指定点の座標を (ξ_P, η_P, ζ_P) とすると、指定点が要素内部に存在する条件は以下の式により求められる。

$$(0 \leq \xi_P \leq 1) \cap (0 \leq \eta_P \leq 1) \cap (0 \leq \zeta_P \leq 1) \cap (\xi_P + \eta_P + \zeta_P \leq 1) \quad (1)$$

2-3-4. 数値データの算出

指定点を含む要素が検索された場合、指定点のベクトル値及びスカラー値 (q_P) を、その要素の節点値 (q_A, q_B, q_C, q_D) を用いて、以下の計算座標系に基づく補間により求める。

$$q_P = q_A + \left(\frac{q_B - q_A}{\delta\xi}\right)(\xi_P - \xi_A) + \left(\frac{q_C - q_A}{\delta\eta}\right)(\eta_P - \eta_A) + \left(\frac{q_D - q_A}{\delta\zeta}\right)(\zeta_P - \zeta_A) \quad (2)$$

なお、非構造格子に基づくシミュレーション結果の可視化処理を高速に行うため、現段階では積分精度、補間精度をともに一次精度の計算を行っている。今後は高精度化について検討する予定である。

3. 計算速度・計算精度の検証

本研究では、四面体要素に基づく非構造格子を用いた有限要素法により解析された立方体建物周辺の気流解析（図

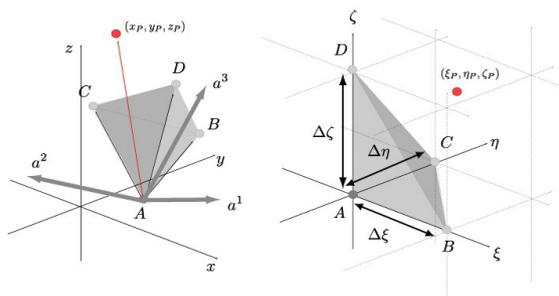


図3 計算座標系への写像

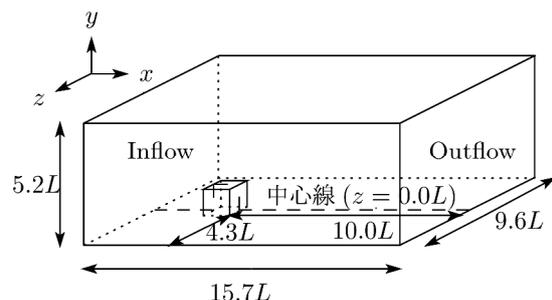


図4 可視化適用例

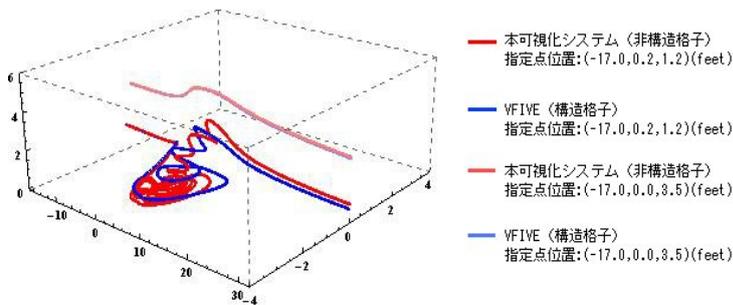


図5 計算精度の比較

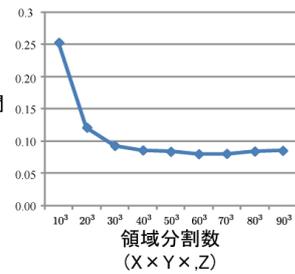


図6 分割領域数による
計算速度の比較

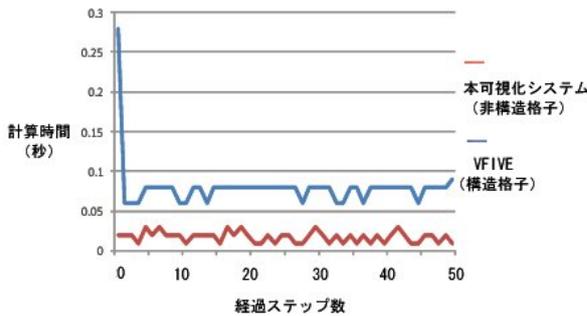


図7 VFIVE との計算速度の比較



図8 VR 空間への投影

4参照)の例を取り上げ、計算速度と計算精度の検証を行った。なお、本可視化システムにおける可視化適用例は総節点数71,292、総要素数394,008 ¥の非構造格子を用いて解析されたものであり、VFIVEにおける可視化適用例は72×45×22(総接点数71,280)のボクセル型格子を用いて解析されたものである。図5はVFIVE ¥と本可視化システムにおいて、同一点上を通る流線の形状を比較したものである。なお、VFIVEは補間精度を3次、積分精度を6次のルンゲ・クッタ法を採用している。図より、本手法とVFIVEとでは、概ね同等の結果を得られていることが確認できる。また、図6は本可視化システムにおいて、計算領域全体に配置された粒子10,000個の流速を計算し、その流速に応じて次ステップの位置を算出する際の平均計算時間を分割領域数毎に比較したものである。図より、本解析例において最も計算速度が早い条件は分割数60(最大包含要素数126)であることが分かる。また、図7は、VFIVEと本可視化システムにおいて上記と同じ条件でステップ毎の計算時間を比較したものである。本可視化システムはVFIVEの計算処理速度には及ばないものの、リアルタイム可視化において処理落ち等の問題が発生せず、時間遅れを感じずに高速に処理を行うことが可能であることが分かる。

4. VR 空間への投影

本研究では、前項で使用した流体シミュレーションの結果を取り上げ、作成した可視化システムの有効性を検討した。なお、可視化装置は没入型 VR システム HoloStage を使用した。図8は構造物周辺のベクトル場を流線と矢印群により VR 空間上に可視化したものである。構造物後方に発生する渦領域等が正確に表示されていることが分かる。また、本可視化システムは複数の可視化機能を同時に表示することにより、視覚効果の高い可視化を実現している。

5. おわりに

本研究では没入型 VR 環境用ソフトウェアである VFIVE を基に、非構造格子に適用可能な流れ解析のための対話的可視化システムの構築を行い、非構造格子に基づく有限要素法により解析された気流解析の結果に適用し、本可視化システムの有効性の検討を行った。本研究で開発した可視化システムを用いることにより、非構造格子データに基づく解析結果に対して、その複雑な領域形状を正確に考慮した可視化を対話的に行う事が可能となった。また、粒子の存在する要素の検索を段階的に行うことにより計算処理の高速化を行い、リアルタイムでの対話的可視化処理を実現した。

今後の課題として、可視化処理の高精度化及び、定量的可視化手法の実用性の向上が挙げられる。

参考文献

- 1) 陰山聡, 大野暢亮: パーチャルリアリティを用いた対話的3次元可視化ソフトウェアの開発とその応用, *J. Plasma Fusion Res.* Vol. 84, No. 11, pp. 834-843, 2008.
- 2) 白山晋: 知的可視化, 計算力学レクチャーシリーズ, 丸善株式会社(2006)