

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

Development of an Interactive Visualization System Using VR Technology for Flow Simulation based on Unstructured Grid

土木工学専攻 43 号 山崎 輔
Tasuku YAMAZAKI

1. はじめに

近年、三次元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¹⁾ 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)²⁾ 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。その中で陰山ら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 VFIVE³⁾ を開発した。しかし VFIVE は、構造格子にのみ対応しているため、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場合には、別途可視化用の六面体の構造格子を用意して補間を行う必要があった。そのため、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対話的可視化システムの構築を行った。また、新たな可視化手法として、定量的可視化手法として VR 空間におけるグラフ可視化手法の構築を行った。なお、システムの構築には、OpenGL と CAVE ライブラリを使用した。非構造格子に基づく数値解析例⁴⁾ 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、四面体による非構造格子に基づいて解析された三次元ベクトル場及びスカラー場の結果を、対話的に三次元可視化するソフトウェアである。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前処理の後、描画スレッドと計算スレッドに分かれて可視化処理を行う。処理はスレッド毎に独立して行われるが、処理に用いる変数データは共有して使用されるため、計算スレッドにおける結果を描画スレッドへ瞬時に反映させることが可能となっている。本可視化システムにおける処理工程の詳細を以下に示す。

2.1 前処理工程

本可視化システムは、予め解析されたシミュレーション結果を読み込み、そのデータを基にリアルタイム処理

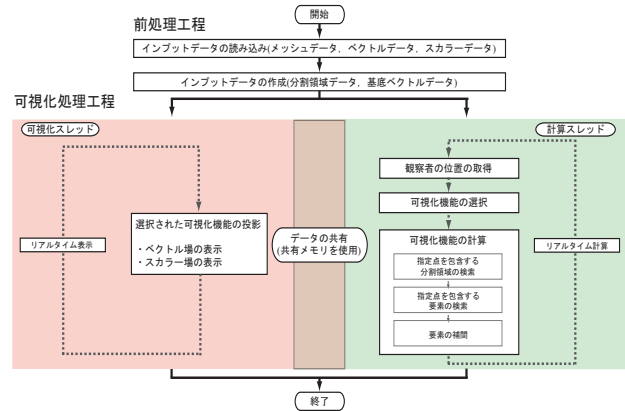


図 - 1 可視化処理工程

することで対話的可視化を実現することを可能としている。入力データには、四面体による非構造格子に基づくメッシュデータ、及びその節点におけるベクトルデータ、スカラーデータを使用しており、これらのデータはすべてバイナリデータで作成されている。また、本可視化システムは、前処理として入力データを用いて、分割領域データ、基底ベクトルデータを追加で生成し、そのデータを可視化処理に適用することで、処理の高速化を行っている。

2.1.1 分割領域データ

本可視化システムは、可視化処理において観察者が指定した点 (指定点) を包含する要素検索の高速化を行うため、バケット法を採用している。分割領域データはバケット法に使用されるメッシュデータであり、対応する分割領域に、入力データとして読み込みしたメッシュデータに対し、要素がどの分割領域内に存在するかの情報を保存したデータである。図 - 2 は、直方体形状の解析領域における分割領域データを示したものである。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、使用する非構造格子メッシュデータに合わせて粗密付けがされている。

2.1.2 基底ベクトルデータ

基底ベクトルデータは、可視化処理において指定点を物理座標系 (x, y, z) (図 - 3 左図参照) から要素ごとに構成される一般化座標系 (ξ, η, ζ) (図 - 3 右図参照) に変換するために使用される⁵⁾。物理座標系から一般化座標系に変換することにより簡単な条件式で要素と指定点の位置関係を調べることが可能となり、高速に要素検索、補間処理を行うことが可能である。

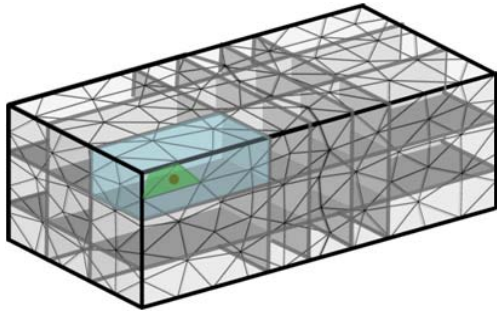


図-2 指定点を包含する要素の検索

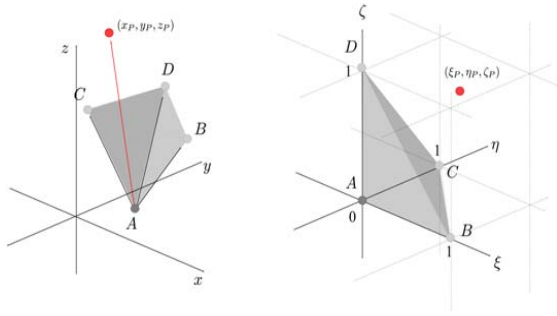


図-3 一般化座標に基づく要素の検索

2.2 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。また、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ことが可能となっている。

2.3 可視化機能の選択

本可視化システムは、観察者がシミュレーション結果を直観的に理解しやす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-4 は、本可視化システムで利用可能な可視化機能を示したものである。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る。図-5 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。

2.4 非構造格子に基づく可視化

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

For Vector data	For Scalar data
Field Lines	Isosurface
Particle Tracer	Local Slicer
Local Arrows	Ortho Slicer
Spotlighted Particle	Volume Rendering
Stream Surface	Probe&Graph
Line Advecter	
Probe&Graph	

図-4 可視化機能



図-5 可視化機能の選択

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。

2.4.1 バケット法に基づく分割領域の検索

本可視化システムは、指定点を包含する要素を高速に検索する手法としてバケット法を採用している。バケット法は、2.1.1 で述べた分割領域データを用い、指定点を包含する分割領域(図-2 青領域)を検索した後、その領域内でのみ指定点を包含する要素(図-2 緑領域)の検索を行う手法である。段階的な領域検索により、要素を高速に検索することが可能である。

2.4.2 一般化座標に基づく要素検索

指定点を包含する領域が判明した後、その領域内部において指定点を包含する要素の検索を行う。本可視化システムでは要素の検索には一般化座標に基づく要素検索を採用した⁵⁾。2.2.1 で述べた基底ベクトルデータを用い、一般化座標系に変換をして行う。一般化座標系における指定点の座標を (ξ_P, η_P, ζ_P) とおくと、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。

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

2.4.3 一般化座標に基づく補間

指定点を包含する要素を検索した後、指定点の物理量 q_p は、節点を含む要素の節点値 (q_A, q_B, q_C, q_D) を用い

て、以下の補間式により求めることができる。

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

ここに、 $(\delta\xi, \delta\eta, \delta\zeta)$ は一般化座標系における節点間距離である。なお、本可視化システムは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、物理量の補間精度は一次精度で計算を行っているが、流線表示機能 (Field Lines, Particle Tracer 等) においては、粒子の次点探索における積分精度に、6 次ルンゲ-クッタ法を採用している。

2.4.4 直前に指定点の存在した要素検索

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要素内、或いはその近傍の要素内にある可能性が高いと考えられる。そのため本可視化システムでは、2 回目の計算以降、指定点が直前に存在した要素から検索する事で要素の検索の高速化を行っている。

3. 計算速度・計算精度の検討

本可視化システムの有効性を検討するため、適用例を通じて VFIVE との計算精度と計算速度の比較を行った。

3.1 大気環境流れ問題による計算速度の検討

都市域における大気環境流れ問題へ本システムを適用し、本可視化システムと VFIVE における計算速度の比較を行った。なお、本可視化適用例では、図 - 6 に示す日本橋周辺の気流解析を行った結果に対し、着目する領域 (図中のボックス領域) を抽出して可視化を行い、両者の比較を行った。可視化領域内の総節点数は 98,387、総要素数は 469,055 である。

図 - 7 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 5,000 個の粒子の流速を計算し、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、本解析例において計算時間が領域分割数の数に従って減少し、 $60 \times 60 \times 60$ 以降、計算時間が一定になることが分かる。また、図 - 8 は計算時間について、分割領域を $60 \times 60 \times 60$ とした本可視化システムと、自由度をほぼ同じとした構造格子を用い、VFIVE で可視化した場合のステップ毎の計算時間を比較したものである。図より、本可視化システムは高速に計算を行うことが可能であり、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。

3.2 三次元柱状流れ場による計算精度の比較

ベンチマーク問題として、解析領域中心から y 軸を基軸として 45 度傾斜した柱状の回転流れ場 (図 - 9 参照) に適用し、計算精度の検証を行った。なお、要素は 5×5



図 - 6 適用例 1 (日本橋周辺気流解析)

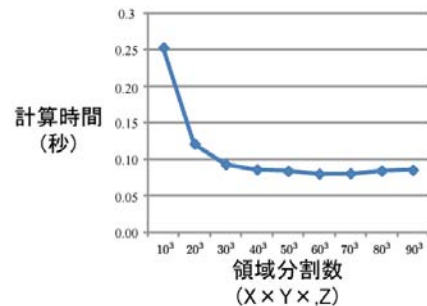


図 - 7 分割領域数による計算速度の比較

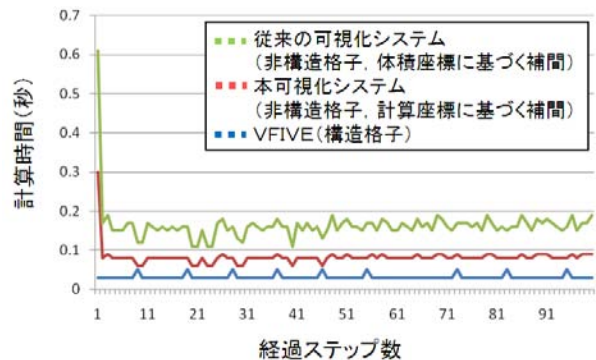


図 - 8 VFIVE との計算速度の比較

$\times 5$ の粗い立方体要素を用いた。

図 - 10 は VFIVE と本可視化システム、及び従来の可視化システムにおいて、同一点から流れる粒子が 4 回転した際の粒子の軌跡を比較したものである。なお、本可視化システム・従来の可視化システムは補間を一次精度、VFIVE は補間を三次精度で計算し、次点の探索の積分は従来の可視化システムは一次精度、VFIVE・本可視化システムは 6 次ルンゲ-クッタ法を採用して計算を行っている。図より、本可視化システムは同一円周上を流れ続けており、従来のシステムより正確に可視化を行えていることが分かる。

4. 定量的可視化機能の追加

数値シミュレーションの可視化において、定量的な可視化を行うことは、そのシミュレーション結果を把握す

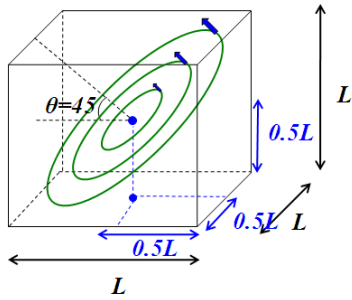


図-9 適用例2 (三次元柱状流れ場)

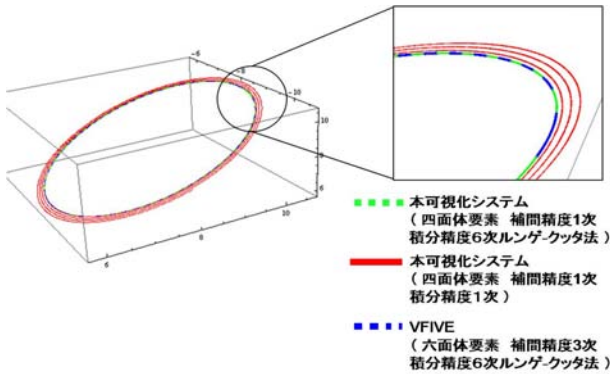


図-10 計算精度の比較

るために有効な手段である.VFIVE では、定量的可視化手法として可視化機能「Probe」がある. この機能は,VR空間上で観察者が指定した位置のベクトル量及びスカラー量を数値表示する機能だが、この機能では一点のみの可視化しかできず、周囲の領域も含めた定量的な可視化を行うことは困難である.そこで本研究では,VR空間内で観察者が任意に指定した二点間のベクトル量・スカラー量のグラフを可視化する機能を追加した.

5. VR空間への投影

可視化適用例として、上述した日本橋周辺気流解析の結果⁴⁾に適用し、本可視化システムの有効性を検証した.なお、可視化装置は没入型VRシステムHoloStageを使用した.HoloStageの詳細については参考文献4)を参照されたい.

図-11は、構造物周辺を流れる風の流線を,VR空間に可視化したものである(Particle TracerとLocal-Arrowsを使用).これにより、構造物後方における渦構造や、剥離流等が詳細に表現されていることが分かる.

また、図-12構造物後方における渦領域において、観察者が任意に指定した二点間のベクトル量をグラフにより可視化したものである.これにより、より定量的な評価をVR空間上で行えることが可能となった.

6. 終わりに

本研究では、複雑な領域形状を持つ流れ解析の可視化を正確に行うために,VR技術を用いた非構造格子に基づく対話的可視化システムの構築を行った.本システムの妥当性と有効性を検討するため、計算精度・計算速度に



図-11 ベクトルデータの可視化



図-12 ベクトルデータのグラフ可視化

ついてVFIVEとの比較を行い、以下の結論を得た.

- 回転流れのベンチマーク問題に対して適用したところ、粗い分割にもかかわらず、本手法はVFIVEとほぼ同じ可視化精度を与えた.
- 粒子の存在する要素の検索を段階的に行うことにより,VFIVEに及ばないものの、時間遅れを感じず高速に可視化を行うことが可能となった.
- VR空間において二点間のベクトル・スカラー量に対話的にグラフ可視化する機能を追加することで、より定量的な評価が可能となった.

今後は、システムの利便性・操作性の向上とともに、新たな可視化手法の構築について検討する予定である.

参考文献

- 1) 廣瀬 通孝：バーチャルリアリティ,産業図書(1993)
- 2) C. Cruz-Neira,C., D.J. Sandin, T.A. DeFanti: Surround Screen Projection Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE; Proc. of SIGGRAPH '93,pp.135-142, 1993
- 3) 陰山聡,上原均,川原新太郎:VR可視化ソフトVFIVEの開発とその地球科学への応用,第32回可視化情報シンポジウム講演論文集,Vol.57, No.6, pp.319-320, 2004.
- 4) 高田知学, 櫻山和男, 谷口健男, 浜田秀敬:都市環境シミュレーションのための三次元都市モデリング手法とプリ、ポスト処理へのVR技術の適用研究,土木情報利用技術論文集,Vol.17,pp279-286,2008年11月.
- 5) 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)