

# 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

## Development of Interactive Visualization System based on Unstructured Grid Using VR Technology

- 山崎輔, 中央大院, 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail : tasuku@civil.chuo-u.ac.jp
- 檜山和男, 中央大理工, 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail : kaz@civil.chuo-u.ac.jp
- 陰山聡, 神戸大院, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail : kage@cs.kobe-u.ac.jp
- 大野暢亮, JAMSTEC, 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail : n\_ohno@jamstec.go.jp
- Tasuku YAMAZAKI, Dept.of Civil Eng., Chuo Univ., Kasuga 1-13-27, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551 Japan
- Kazuo KASHIYAMA, Dept.of Civil Eng., Chuo Univ., Kasuga 1-13-27, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551 Japan
- Akira KAGEYAMA, Kobe University, Rokkoudai-cho 1-13-27, Sinada-ku, Kobe, 657-8501 Japan
- Nobuaki OHNO, JAMSTEC, Showa-machi 3173-25, Kanazawa-ku Yokohama, Kanagawa, 236-0001 Japan

This paper presents an interactive visualization system for the 3D flow simulation based on unstructured grid for the CAVE system. This system is based on the conventional VFIVE which is general purpose visualization software for structured grid. The present system is written by VR (Open GL and CAVE library) programming. In order to verify the validity and the effectiveness of the present visualization system, the quality and computational time are investigated by the comparison with the VFIVE.

### 1. はじめに

近年, コンピュータのハードウェアの飛躍的な性能向上により, 三次元数値シミュレーションが広く行われるようになってきている。しかし, ディスプレイやプロジェクター等の二次元表示媒体による可視化表示では, シミュレーション結果の三次元的構造を正確に把握することは困難である。これらの問題を解決するために, VR (Virtual Reality) 技術<sup>1)</sup>に基づく立体視による可視化が注目を集めている<sup>2)</sup>。本研究では VR 技術の中でも, 高い没入感を得ることが可能な CAVE (CAVE Automatic Virtual Reality Environment)<sup>3)</sup> に代表される没入型映像投影技術 (Immersive Projection Technology : IPT)<sup>4)</sup> に注目した。

CAVE に対応したソフトウェアは多数開発されているが, その中で, 観察者の位置情報やコントローラの操作情報により対話的な可視化を行うことが可能なソフトウェアとして VFIVE (Vector Field Interactive Visualization Environment)<sup>5)</sup> がある。VFIVE は CAVE 装置で利用可能な汎用ソフトウェアであるが, 構造格子状に配置された六面体の構造格子データのみに対応しており, 非構造格子によるシミュレーション結果の可視化を直接行うことは困難である。従って, 非構造格子による結果の可視化を行う際には, 別途可視化用の構造格子を作成し, 構造格子の節点の値を非構造格子の節点の値を用いて補間して表示を行っていた。しかし, 複雑な領域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 の可視化機能はそのままに, 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。本システムの有効性を検討するため, 可視化の計算処理時間と補間等の精度について, VFIVE との比較を行った。

### 2. VR 環境

本研究では, VR 技術として, 没入型映像投影技術 (IPT)<sup>4)</sup> を用いており, VR ディスプレイには没入型三面ディスプレイを採用している。Fig. 1 は, 本報告で用いている没入型 VR システム HoloStage を示している。VR 空間に没入した観察者はディスプレイ内に構築される三次元空間を立体視すると同時に, コントローラを用いて対話的に操作することで, 対象物を三次元的に, 正確

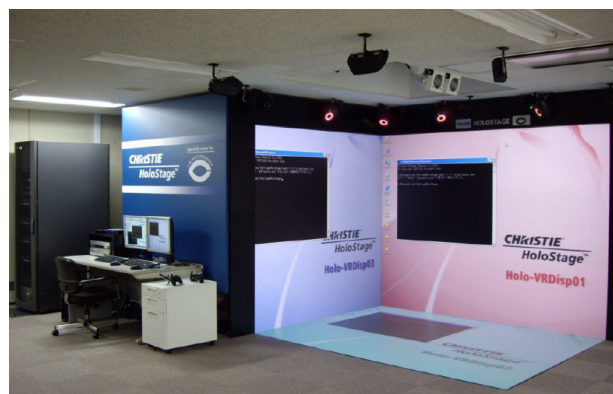


Fig. 1 Immersive VR device "HoloStage"

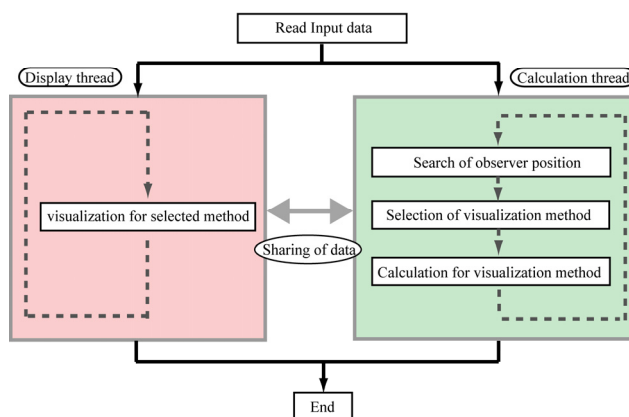


Fig. 2 Process of visualization

かつ直感的に把握することができる。本装置の詳細については参考文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

### 3. 可視化システムの構築

VR 空間における対話性の高いソフトウェアとして, 海洋研究開発機構地球シミュレータセンター高度計算表現法研究グループが開発した VFIVE がある<sup>5)</sup>。VFIVE 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 により構成されており, 六面体による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ことが可能なソフトウェアである。

本研究では VFIVE の機能はそのままに, 非構造格子への適用が可能となる対話的可視化システムの構築を行った。さらに, VFIVE にない機能として, 粒子に基づく可視化において物理量の大きさに応じて粒子の色を表示する機能を追加した。Fig. 2 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。計算スレッドにおける可視化処理工程の詳細を以下に示す。

### 3.1. 入力データの読み込み

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することで対話的可視化を実現することが可能となっている。入力データには, 解析結果のデータや構造物の表面データがある。また, 詳しくは後述するが, 解析領域内における要素検索を高速に行うための領域分割データ, 基底ベクトルのデータの読み込みも行う。なお, 入力データをバイナリデータで作成することにより, データの読み込みの高速化を行っている。

### 3.2. 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。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。

### 3.3. 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。Fig. 3 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。Fig. 4 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。

### 3.4. 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。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となるため, 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までの処理を以下に示すように段階的に行うことにより, 計算処理の高速化を行った。

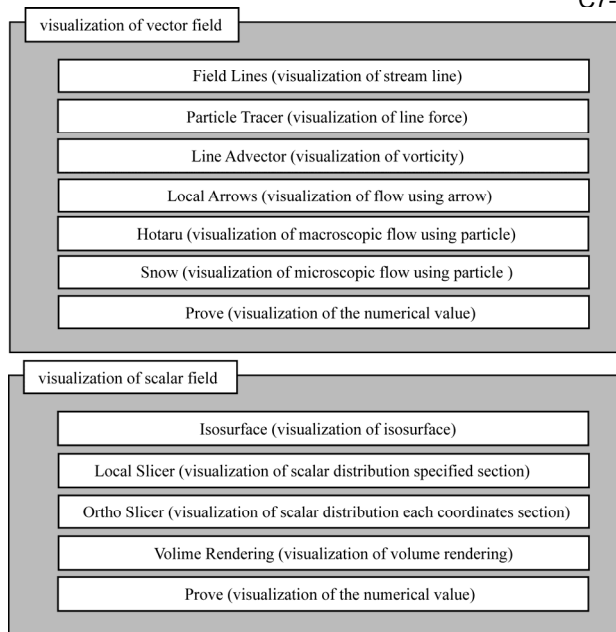


Fig. 3 Visualization methods

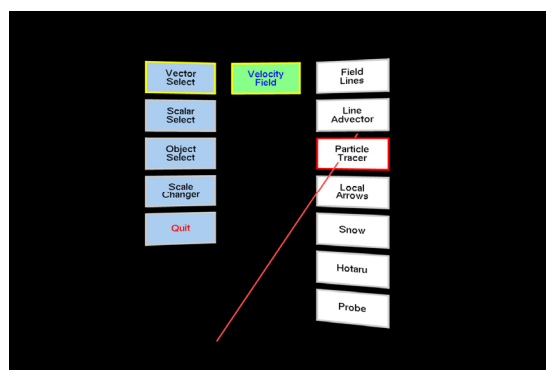


Fig. 4 Menu of visualization method

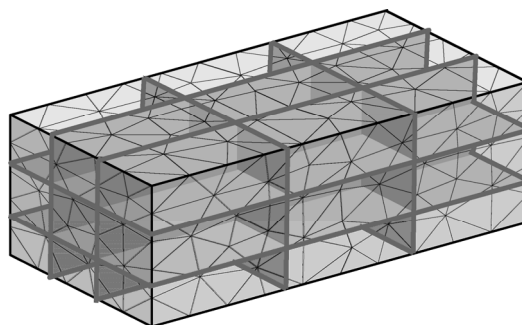


Fig. 5 Domain decomposition for the element search

#### 3.4.1. 事前データの作成

要素の検索を高速に行うために, 事前データとして領域分割データと基底ベクトルデータ<sup>6)</sup>を用意する。

まず, 領域分割データとして, 非構造格子全体を包含する構造格子状のデータ (Fig. 5 参照) を作成する。そして, 非構造格子の各要素が領域分割されたどの領域にあるかの検索を行う。検索の際, 要素の一部が分割領域内に存在する場合も, その領域内に要素が存在するものとする。以上の処理により, 非構造格子の各要素が領域分割されたどの領域にあるかのデータが作成される。

次に, 要素の検索に必要な反変基底ベクトルを算出する。メッシュを構成する各要素において事前に反変基底ベクトルを算出しておくことで, 実際にリアルタイム計算を行う際に必要な計算処理の軽減を行うことが可能である。

各要素における反変基底ベクトル  $a^1, a^2, a^3$  は以下の式により求めることができる。

$$a^1 = \frac{1}{J} a_2 \times a_3, a^2 = \frac{1}{J} a_3 \times a_1, a^3 = \frac{1}{J} a_1 \times a_2 \quad (1)$$

なお,  $a_1, a_2, a_3$  は共変基底ベクトル,  $J$  はヤコビアンを示しており, それぞれ以下の式により求める。

$$\begin{cases} a_1 = (x_B - x_A, y_B - y_A, z_B - z_A) \\ a_2 = (x_C - x_A, y_C - y_A, z_C - z_A) \\ a_3 = (x_D - x_A, y_D - y_A, z_D - z_A) \end{cases} \quad (2)$$

$$J = a_1 \cdot (a_2 \times a_3) \quad (3)$$

なお,  $x_A, x_B, x_C, x_D$  は, 要素を構成する 4 つの節点座標を表したものである。

### 3.4.2. 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。

### 3.4.3. 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むしなかった場合, 事前データとして読み込んだ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。領域の検索には, 座標軸毎に座標の大きさを比較することで指定点がどの分割領域内に存在するかを検索が容易に行え, またその検索も高速に行うことが可能である。

### 3.4.4. 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, 指定点はその領域内のどの要素に含まれるかを検索する。要素の検索には, 事前データとして用意した反変基底ベクトル<sup>6)</sup>を使用する。反変基底ベクトルを用いて計算することで指定点を実際の座標系  $(x, y, z)$  (Fig. 6 左図参照) から要素毎に構成される簡単な計算座標系  $(\xi, \eta, \zeta)$  (Fig. 6 右図参照) に写像することができる。指定点の計算空間へ写像における式は以下のようになる。

$$\begin{cases} \xi_P = a^1 \cdot (x_P - x_A) \\ \eta_P = a^2 \cdot (x_P - x_A) \\ \zeta_P = a^3 \cdot (x_P - x_A) \end{cases} \quad (4)$$

なお,  $(\xi_P, \eta_P, \zeta_P)$  は計算座標系における指定点の座標値を表しており, 指定点が要素内部に存在する条件は, Fig. 6 を参考にして, 以下の式により求められる。

$$(0 \leq \xi_P \leq 1) \cap (0 \leq \eta_P \leq 1) \cap (0 \leq \zeta_P \leq 1) \cap (\xi_P + \eta_P + \zeta_P \leq 1) \quad (5)$$

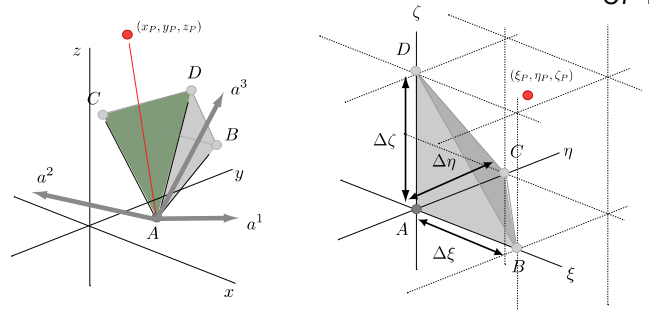


Fig. 6 Mapping to the calculation coordinates

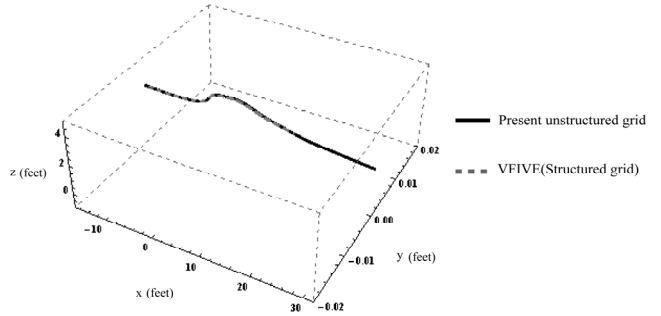


Fig. 7 Comparison of particle path

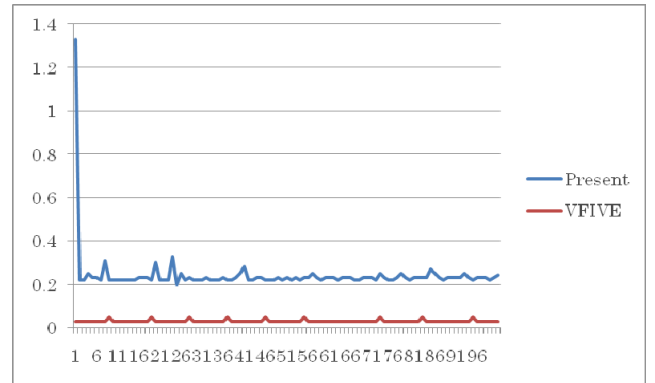


Fig. 8 Comparison of computing time

### 3.4.5. 指定点における数値データの算出

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。

$$q(\xi_P, \eta_P, \zeta_P) = q_A + \left(\frac{q_B - q_A}{\Delta \xi}\right)(\xi_P - \xi_A) + \left(\frac{q_C - q_A}{\Delta \eta}\right)(\eta_P - \eta_A) + \left(\frac{q_D - q_A}{\Delta \zeta}\right)(\zeta_P - \zeta_A) \quad (6)$$

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。

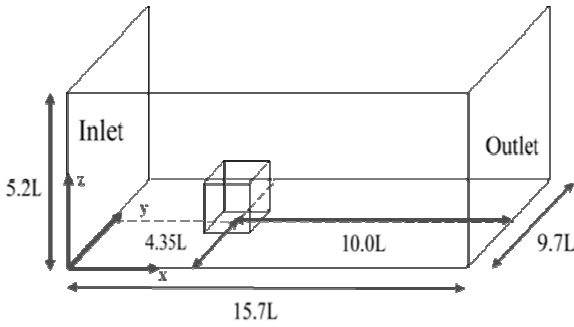


Fig. 9 Computational model

#### 4. VFIVE との比較

Fig. 7はVFIVEと本可視化システムにおいて、同一点に粒子を一定間隔で発生させ、その点から流れる粒子の軌跡をグラフに表して比較したものである。なお、VFIVEでは、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、同等の結果を得られていることが確認できる。

また、Fig. 8はVFIVEと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に必要な時間を比較した図である。これより、本手法は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となった。

#### 5. VR空間への投影

本研究では可視化適用例として、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気流解析 (Fig. 9 参照) の例を取り上げ、作成した可視化システムの有効性を検討した。なお、本可視化適用例は、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る。

Fig. 10は構造物周辺のベクトル場を、Fig. 11は構造物に前面におけるスカラー場布をVR空間上に可視化したものである。構造物後方における渦現象や、剥離流等が表現されていることが分かる。また、流線や圧力分布が構造物内部に侵入する問題が生じず、本可視化システムでは構造物の形状を考慮した可視化が行われていることが分かる。また、Fig. 12は指定位置におけるベクトルデータ及び圧力データを数値化して表示させたものである。これにより、観察者は流れのシミュレーション結果を定性的だけでなく、定量的にも観察する事が可能となっている。

#### 6. 結論

本研究では、構造格子に基づく没入型VR環境用ソフトウェアであるVFIVEを基に、その機能はそのまま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った。本システムの妥当性と有効性を検討するため、本手法を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の可視化に適用し、以下の結論を得た。

1. 非構造格子に対応した可視化システムを構築することにより、領域形状を正確に考慮した可視化を行い、流れ現象の詳細を把握することが可能となった。
2. 粒子の存在する要素の検索を段階的に行うことにより、可視化処理の高速化を行った。

今後は、可視化処理の高速化及び高精度化を行うと共に、都市の気流解析など複雑な領域形状を有する問題への適用を行う予定である。

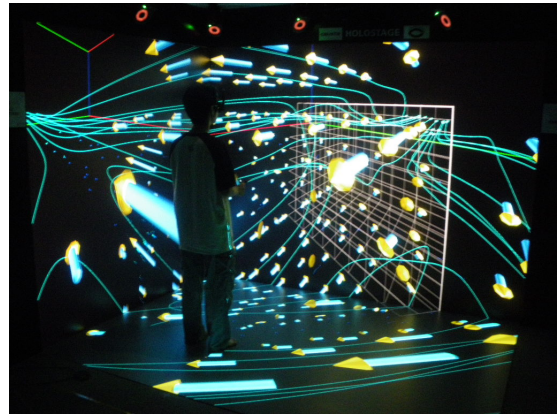


Fig. 10 Visualization for vector field in VR space



Fig. 11 Visualization for scalar field in VR space



Fig. 12 Visualization of the numerical data at specific point

#### 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) 高山知学，檜山和男，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。
- 3) 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
- 4) 小木哲朗：没入型ディスプレイの特性と応用の展開，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.1, No.4, pp.43-49, 1999
- 5) 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.
- 6) 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）