

視線上の特徴量を用いたボリュームレンダリングの基礎検討

A Preliminary Study on Volume Rendering Using Ray-wise Feature Distributions

松田 英悟[†]
Eigo Matsuda澤山 正貴[†]
Masataka Sawayama土橋 宜典^{†*}
Yoshinori Dobashi

1. はじめに

映画やゲームなどでよく利用される CG 表現として炎や煙などの流体现象が挙げられる。このような流体现象を表現する形式の一つとしてボリュームデータがあり、ボリュームデータを可視化する手法としてボリュームレンダリングがある。ボリュームレンダリングにおいては、伝達関数の設計が可視化結果の品質に大きく影響する。しかし、伝達関数の設定にはスカラー値と色・不透明度の対応関係を理解する必要があり、専門的な知識や多くの試行錯誤が要求されるため、ユーザにとって大きな負担となる。

本研究では、ボリュームデータにおける特徴量分布と、それに対応する画像の輝度情報との関係性を利用することで、ユーザによる伝達関数の明示的な設計を必要とせず、目的とする可視化画像を生成する手法の検討を行うことを目的とする。

2. 提案手法

本研究では、視線上のボリュームデータの物理量とユーザの入力画像の輝度との対応関係に基づき、可視化画像を生成するボリュームレンダリング手法を提案する。基本的な考え方は以下のとおりである。

提案手法への入力は、ボリュームデータと、特定の視点から観察した際に得られるべき参照画像である。参照画像は、ユーザが望む質感を表現した画像であり、ペイント操作や画像処理などによって生成される。本研究の目的は、異なる視点から観察した場合でも、参照画像と類似した質感を持つ可視化画像を生成することである。

本手法では、この目的を実現するために、テクスチャ合成の考え方を応用する [1][2]。まず、入力として与えられた視点からボリュームデータを観察した際に得られる、視線上の物理量（温度や密度など）の分布と参照画像の画素の色との対応関係に基づき、データベースを構築する。新たな視点を与えられた場合には、各画素に対応する視線上の物理量の分布を計算し、このデータベースを用いて対応する色を決定する。

ただし、視線上の物理量の分布は高次元となるため、データベースのサイズ増加や検索処理の計算負荷が課題となる。これに対処するため、本手法では主成分分析 (PCA) により次元を削減し、さらにデータベース検索の代替として放射基底関数 (RBF) 補間を用いることで、高速な色決定処理を実現する。以下に、各処理の詳細を説明する。

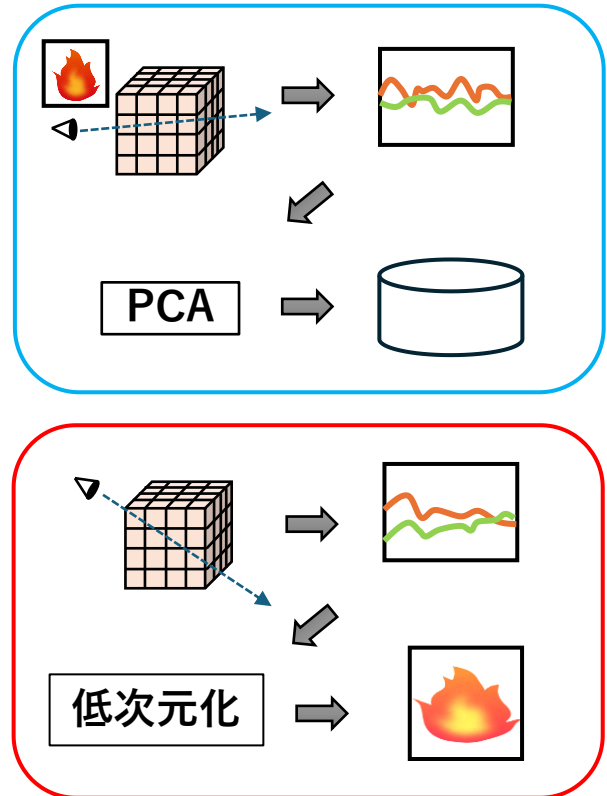
[†]北海道大学 Hokkaido University[‡]プロメテック CG リサーチ Promotech CG research

図1 (上)事前計算 (下)実時間処理

2.1 提案手法の概要

提案手法は大きく二つの処理段階から構成されている (図 1 参照)。まず、事前計算では、指定された視点から見たボリュームデータの物理量分布を取得する。得られた分布に対して PCA を適用することで次元削減を行い、計算効率を向上させるとともに、補間処理を行うための基底関数中心を選択する。そして、参照画像を用いて RBF の重みを事前に計算し、PCA により得られた基底ベクトルと併せて保存しておく。

次に、実時間処理では、任意の視点から新たに得られた物理量分布に対して、事前に計算基底ベクトルを用いて主成分空間に射影し、RBF の重みを用いて補間画像を生成する。これにより、任意の視点から得られる新たな物理量分布に対して、主成分空間への射影と RBF 補間を用いて対応する補間画像を実時間で生成可能となる。本手法は、伝達関数の設計を必要とせず、ユーザが入力した画像に基づいて視覚的に一貫性のあるボリュームレンダリングを実現する点において有用である。

2.2 事前計算

事前計算では、指定された視点から見た各ピクセルに対応するボリュームデータの物理量（密度、温度など）を視線に沿って一定間隔でサンプリングして高次元ベクトルとして取得する。次に、全てのピクセルに対して取得した物理量分布に対して主成分分析を適用することで次元削減を行う。この際に物理量分布の平均と主成分ベクトルは実時間処理での主成分空間への射影で再利用する。

次に、実時間処理で RBF 補間を円滑に行うために、RBF の重みを事前に計算する。RBF 行列は以下の式で表される。

$$A_{ij} = \varphi(\|x_i - c_j\|)$$

ここで、 A は RBF 行列、 x は物理量ベクトル、 c は基底関数の中心を表す。基底関数の中心は物理量ベクトルから k -means 法によりクラスタリングを行って選択する。また、RBF 基底関数 $\varphi(r)$ には、次式で表されるガウス型の関数を用いる。

$$\varphi(r) = e^{-\varepsilon r^2}$$

ε はガウス関数の分散に相当するパラメータである。最後に、RBF 行列 A と入力画像の輝度 y を用いて RBF の重み w は以下の式により最小二乗法で求められる。

$$w = (A^T A)^{-1} A^T y$$

2.3 実時間処理

実時間処理では、任意の視点から新たに得られた物理量分布を事前計算の主成分分析で得られた平均を用いて中心化し、基底ベクトルとの内積を計算することで主成分空間へ射影する。新たに得られた物理量分布に対する RBF 行列 B と事前計算で求めた RBF の重み w を用いて補間画像 y' は以下の式によって求められる。

$$y' = Bw$$

3. 実験

本研究では、ユーザが入力した参照画像に対し、提案手法を用いて新たな視点からの画像を生成する実験を行った。入力画像としては、ある視点から見た炎の画像（128×128 ピクセル）の輝度を編集したものを用意し、それに対してカメラ視点を回転させたときの画像を生成した。

提案手法では、主成分分析による次元削減後の次元数、基底関数の中心の数、ガウス関数の係数の 3 つのパラメータを設定する必要がある。本実験は全探索により各パラメータの最適な値を求めた。具体的には、ボリュームデータは温度および密度の 2 種類の物理量を含み、サイズは 64×64×64 ボクセルである。視線上の各ピクセルに対して、温度と密度の物理量をそれぞれ 55 点ずつサンプリングし、合計 110 次元の物理量ベクトルを構成した。これに対して PCA を適用し、累積寄与率が 95% となるように、温度は 8 次元、密度は 5 次元に次元削減を行った。RBF 補間では 52 個の基底関数を用い、ガウス関数の係数は 5×10^{-5} に設定した。処理は Intel Core i7-12700T (1.40GHz) を搭載した PC

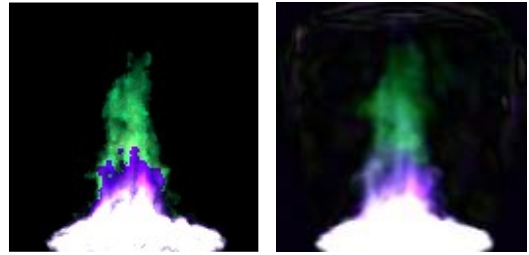


図2 (左)入力画像 (右)補間画像

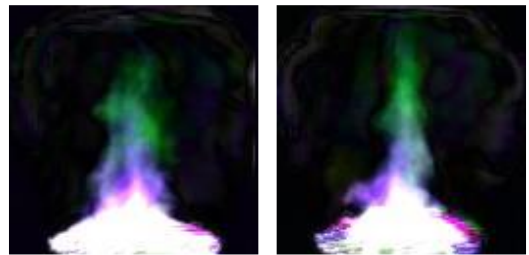


図3 異なる視点の補間画像

上で実行し、事前計算時間は約 2.28 秒、実時間処理にかかる時間は 1 視点あたり平均 0.066 秒であった。

図 2 に、参照画像（左）および提案手法によって生成された画像（右）を示す。いずれも同じ視点位置から生成された画像である。提案手法による生成結果は、入力画像の特徴を保持しており、視覚的に自然な画像が得られていることが確認できる。

次に、図 3 に示すように、異なる視点からの画像を生成した。左図はわずかに視点を変えた画像、右図は大きく視点を変えた画像である。結果として、炎の立体的な構造や参照画像の質感が保たれたまま、滑らかに視点が遷移する画像が得られた。一部のサンプルでは背景や細部形状の歪みが見られたが、全体としては空間的な整合性が維持されており、提案手法の有効性が示唆された。

4. おわりに

本稿では、参照画像の質感を保つようボリュームデータをレンダリングする手法について提案した。実験により、本手法によって生成された画像は、ユーザが入力した画像の輝度分布をある程度近似できることが確認された。一方で、補間画像にはノイズが含まれており、特に入力画像とは異なる視点から生成された補間画像では、ノイズの量が増加する傾向が観察された。これは、視点の変化によって、事前に計算した物理量分布との対応関係が不安定になることに起因していると考えられる。また、本実験では補間パラメータの最適化に全探索を用いており、計算コストが非常に高いという課題がある。したがって、今後は補間精度を維持しつつ計算効率を向上させるための効率的な最適化手法の導入が求められる。

参考文献

- [1] Aaron Hertzmann, Charles E. Jacobs, Nuria Oliver, Brian Curless, and David H. Salesin, Image analogies. Proc. SIGGRAPH '01, pp. 327–340 (2001).
- [2] K. Iwasaki, Y. Dobashi, M. Okabe, Example-based Synthesis of Three-dimensional Clouds from Photographs, Proc. of Computer Graphics International (short paper), pp. 28:1–28:6, 2017.