

煙の輪郭形状を用いた乱流パラメータの推定に関する一検討

川住 遼典^{1,a)} 土橋 宜典^{1,b)}

概要: 映像技術の発展により映画やゲームなど様々な場面でコンピュータグラフィックス技術が用いられており、効率的なシミュレーション手法や目的形状を生成する手法が開発されている。一方で、煙などの流体現象の質感は詳細な乱流成分の表現に大きく依存する。しかし、目的の質感を表現するためには、乱流成分に関するパラメータを試行錯誤により手動で調整しなければならず、手間がかかる。本研究では、ユーザにより用意された乱流の程度を表すシミュレーション画像やスケッチから、その乱流の程度を再現するパラメータを推定する手法を提案する。これにより、パラメータ決定にかかる手間を削減できる。

キーワード: 流体シミュレーション, CG, パラメータ推定

A Study on Estimation of Turbulence Parameters Using Smoke Contour Shapes

Abstract: Computer graphics technology has been used in many applications such as movies and video games, and different methods have been developed including those for efficiency and/or for generating the desired shapes and motions. The appearance of fluid phenomena such as smoke is highly dependent on the representation of detailed turbulence motions. However, in order to produce the desired appearance, parameters related to the turbulence must be adjusted manually through trial and error processes, which is time-consuming. In this study, we propose a method to estimate the parameters from user-specified images so that the appearance becomes similar to those in the specified images. By using our method, the user can determine the parameters efficiently.

Keywords: fluid simulation, CG, parameter estimation

1. まえがき

映像技術の発展により映画やゲームなど様々な場面でコンピュータグラフィックス技術が用いられている。煙や炎などの流体現象の表現は映像のリアリズムを向上するための重要な要素であり、様々な手法が提案されてきた。それらの手法により、複雑な流体現象のリアルな映像表現が可能となっている。一方、これらの流体現象の質感は詳細な乱流成分の表現に大きく依存する。しかし、乱流成分に関するパラメータは試行錯誤により手動で調整しなければならず、手間がかかる。本研究の目的はこの問題を解決することにある。具体的には、ユーザにより用意された乱流の程度を表す画像もしくはスケッチから、その乱流の程度を

再現するパラメータを推定する。これにより、試行錯誤にかかる手間を削減できる。本稿では、2次元の煙のシミュレーションを用いて乱流パラメータを推定する実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 関連研究

Fedkiwらは、数値シミュレーションで失われる微細な渦の効果を再現する渦補完力を提案した [1]。この手法により、複雑な乱流成分を容易に再現できる。ユーザは渦補完力の強度に関する係数を調整することで乱流の程度をコントロールできる。しかし、高解像度のシミュレーションには計算時間がかかるため、より効率的に乱流の効果を表現する手法が提案されている。Kimらは流体シミュレーションとノイズを組み合わせることで乱流を疑似的に付加する手法を提案している [2]。Satoらは低解像度のシミュレーション結果に、高解像度のシミュレーション結果の高周波

¹ 北海道大学
Hokkaido University

a) kawazumi@ime.ist.hokudai.ac.jp

b) doba@ime.ist.hokudai.ac.jp

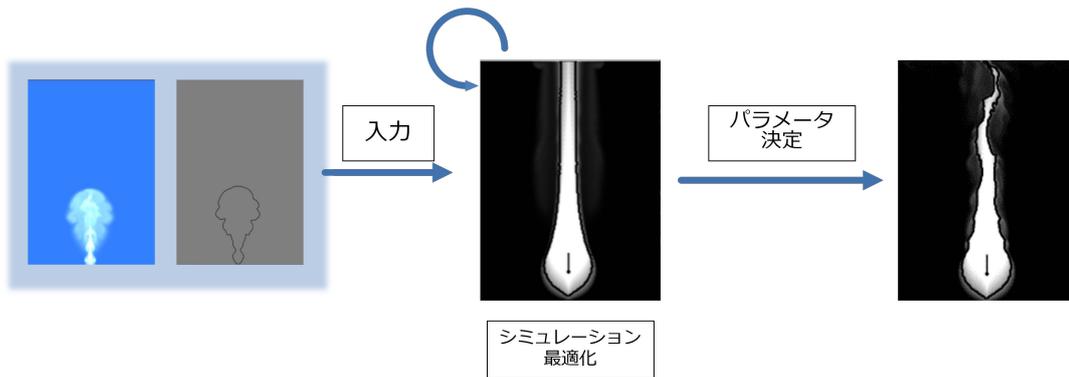


図 1: 提案手法の処理の流れ

成分を転写することで、乱流を効率的に表現する手法を提案している [3]. Kawazumi らは低解像度のシミュレーションと高解像度の 2D シミュレーションを組み合わせて、乱流を効率的に表現する手法を提案している [4]. これらの手法は、高解像度のリアルな映像を効率的に作成することができるが、乱流の程度は試行錯誤により手動で調整する必要がある。鈴木らは粘性の高い流体の動画から、その粘性を表すパラメータを推定する手法を提案している [5]. しかし、この方法は乱流パラメータを推定することはできない。

3. 提案手法

本研究の目的は実写画像から Fedkiw らの渦補完力 [1] の係数（以下、渦補完係数と呼ぶ）を推定することである。本節では輪郭線形状を用いて渦補完係数を推定する手法を提案する。提案手法の処理の流れを図 1 に示す。最適化手法における入力には煙の画像を用いる。提案手法では、入力画像から輪郭形状を抽出し、輪郭上の各点における曲率

を計算する。そして、その曲率の平均値と一致するように渦補完係数を最適化することで、入力の乱流成分を再現する渦補完係数を推定する。

3.1 輪郭線の曲率を用いた最適化手法

提案手法では画像が入力として与えられた場合、その画像を指定された閾値で二値化し、二値化した画像の境界部を輪郭線として抽出する。なお、ユーザは、輪郭の形状を直接スケッチ入力によって与えることも可能である。輪郭線は離散的な点列として与えられる。

次に、抽出した輪郭線を構成する各頂点において曲率を計算する。曲率とは点の曲がり度合いを示す指標であり、数値が大きいほど曲がり強いことを示している (図 2)。本研究では、連続する 3 つの頂点を通過する円を求め、その半径の逆数として曲率を計算した。

輪郭線におけるすべての点の曲率を計算した後、それらの平均曲率 C_{input} を求める。次に流体シミュレーションを実行し、煙の密度分布を閾値処理によって二値化し、同様に輪郭線を取得する。そして、シミュレーションの輪郭線の平均曲率 C_{sim} が、入力の輪郭線の平均曲率 C_{input} に一致するように渦補完係数 ϵ の最適化を行う。具体的には、タイムステップ i での渦補完係数の値を ϵ_i と書くと、 C_{sim} と C_{input} の差分を取り、重み α を乗算したものを引くことで、新たな ϵ_{i+1} を求める (式 (1))。この処理を繰り返すことにより ϵ を最適化する。

$$\epsilon_{i+1} = \epsilon_i - \alpha * (C_{sim} - C_{input}) \quad (1)$$

この最適化処理はシミュレーションの N ステップごとに実行される。 N はユーザにより指定する。これは、1 ステップごとに処理を行ってしてしまうと値が収束せず振動してしまうためである。

3.2 輪郭線によるシミュレーション形状の操作

提案手法では、入力された画像、もしくはスケッチの乱流成分を再現するような渦補完係数を推定する。しかし、

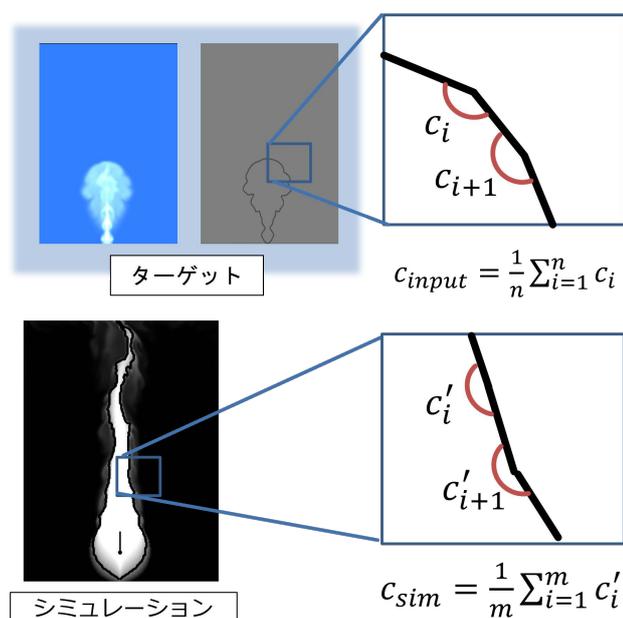


図 2: 曲率について

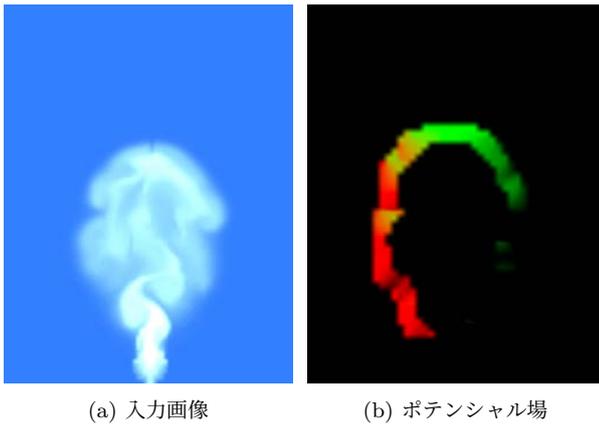


図 3: 輪郭線形状を用いたポテンシャル場の生成

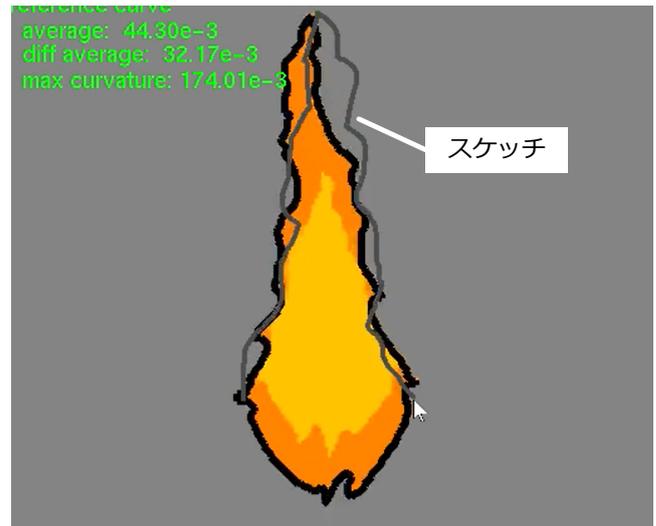


図 5: しきい値処理を施したセル画調アニメーション

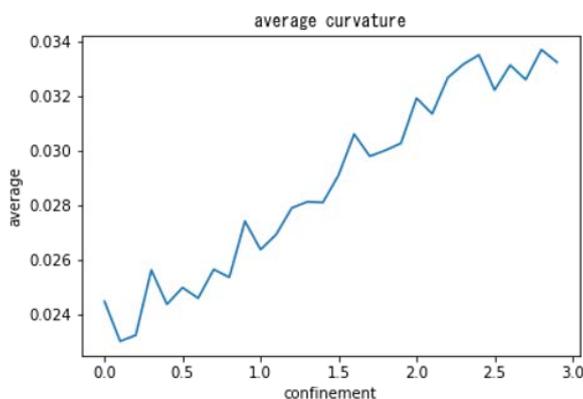


図 4: 曲率と渦補完係数の関係

この手法では入力画像における流体形状までを再現することができない。そこで、Fattal らの手法 [6] を用いることにより、特殊な外力によって煙の形状を入力に一致させる。

3.1 節で述べたように、提案手法では入力画像を二値化して、その境界部を輪郭線として取得している。この二値化した画像に対して、ガウスフィルタを適用した後に微分フィルタを適用し、各画素における勾配方向を算出する。この勾配方向に向けた外力を生成することで、流体が存在する領域へ密度分布を閉じ込める (図 3)。これにより、入力の形状に近い見た目を持たせながら、渦補完係数を最適化したシミュレーションを実行できる。

4. 実験結果と考察

はじめに、予備実験として渦補完係数と輪郭線の曲率にどのような相関がみられるのかを調べたところ、以下のような結果が得られた (図 4)。図 4 より、渦補完係数と輪郭線の曲率には一次関数的な相関が見られており、曲率で最適化を行うことで最適な渦補完係数を決定することができることがわかった。

次に、提案手法を用いて渦補完係数を推定し、その値を用いてシミュレーションを行った煙の画像を結果として示

す。また、応用として Fattal らの手法 [6] を用いて形状を操作したシミュレーション画像も合わせて示す。

実験に用いた計算機環境は、CPU が Intel(R) Core(TM) i7-4790K(4GHz)、メモリが 16.0GB、GPU が GeForce GTX TITAN X となっている。提案手法を用いた実験結果を図 6 に示す。提案手法を用いて渦補完係数を最適化したシミュレーション (図 6b) では、入力画像 (図 3a) の詳細な成分を再現することができている。また、形状操作を行ったシミュレーション (図 6c) では入力画像のおおよその形状も再現できており、入力に近い見た目を持つシミュレーションを作成できている。

次に、応用的な実験として、提案手法を用いてセル画調シミュレーションを生成した。提案手法では、輪郭線のスケッチを入力とすることで、ユーザーの求める煙の詳細な動きを表現することができる。さらに、煙の密度分布に応じてシミュレーションの輝度値を変えることで、詳細な動きを持ったセル画調の煙を表現することができる。具体的には、密度分布に一定の閾値を設け、濃い部分と薄い部分の輝度値を指定することにより、アニメーションで見られるようなセル画調のシミュレーションを生成できる (図 5)。さらなる応用として、シミュレーションの輪郭線を、漫画的表現で用いられるような非現実的な形状に変えることができれば、よりアニメーションに近いセル画調の煙を、シミュレーションで簡単に表現できると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では輪郭線形状の曲率に基づいた、渦補完係数の最適化手法を提案した。一般に、シミュレーションにおける乱流成分を試行錯誤により手動で決定する必要があったが、提案手法により、ユーザは指定の形状を再現する渦補完係数を求め、目的の質感を表現することができるようになった。実験結果では、最適化されたシミュレーションに

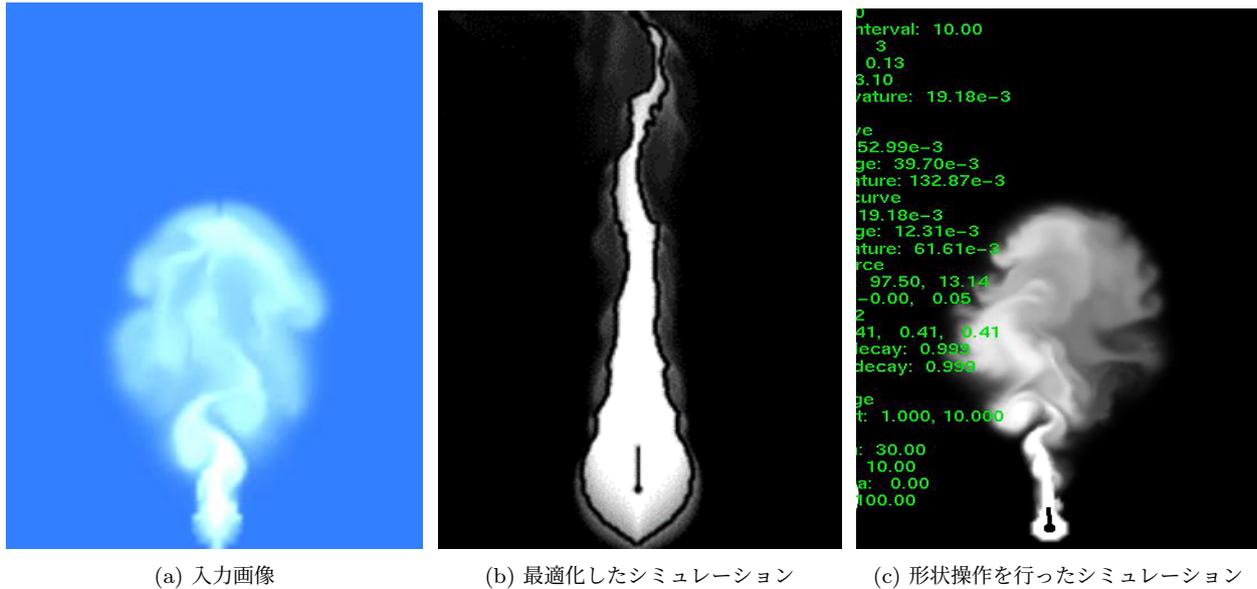


図 6: 実験結果

において入力画像の乱流成分を再現できており、入力に基づいた渦補完係数を推定できていることがわかる。

今後の課題としては最適化手法をより効率化することと3Dシミュレーションへの適用が挙げられる。今回の手法ではシミュレーションを何度も繰り返すことで渦補完係数を最適化しているが、今後は最適化曲率と渦補完係数の関係を式で表現し、その微分式から最適な係数を推定する手法を考えたいと思っている。また、現在は2Dシミュレーションの実験のみにとどまっているため、3Dシミュレーションにも本手法を適用したいと考えている。

参考文献

- [1] R. Fedkiw, J. Stam, H. W. Jensen. "Visual Simulation of Smoke," Proc. SIGGRAPH' 01, 2001, pp. 15-22.
- [2] T. Kim, N. Thurey, D. James, M. Gross: "Wavelet Turbulence for Fluid Simulation", ACM Trans. on Graphics, Vol.27, No.3, Article 3 (2008)
- [3] S. Sato, Y. Dobashi, T. Kim, T. Nishita: "Example-Based Turbulence Style Transfer", ACM Trans. on Graphics, Vol.37, No.4, Article 84 (2018).
- [4] Ryosuke Kawazumi, Yoshinori Dobashi, "Synthesizing high-resolution clouds using 2D and 3D simulations", IEEEJ Transactions on Image Electronics and Visual Computing, Vol.2, No.9(2021).
- [5] 鈴木 貴如, 長澤 謙太郎, 岡田 真人, 楽 詠 "機械学習を用いた動画像からのハーシャル・バルクレイ流体のパラメータ推定の検討", 情報処理学会研究報告, Vol.2019-CG-175, No.4 (2019).
- [6] Fattal, R., Lischinski, D. 2004. "Target-driven smoke animation." ACM Transactions on Graphics 23, 3 (Aug.), 439-446.