JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	ラグランジアンコヒーレント構造によるスケッチベース煙デザイン手法の提案
Author(s)	有原, 啓介; 謝, 浩然; 佐藤, 周平; 宮田, 一乗
Citation	研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学（CG）, 2022-CG-185(4): 1-11
Issue Date	2022-03-04
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/17616
Rights	社団法人　情報処理学会, 有原 啓介, 謝 浩然, 佐藤 周平, 宮田 一乗, 情報処理学会研究報告.CG, コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学,2022-CG-185(4), 2022, pp.1-11.　ここに掲載した著作物の利用に関する注意: 本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

Vol.2022-CG-185 No.4
2022/3/11

ラグランジアンコヒーレント構造による スケッチベース煙デザイン手法の提案

有原 啓介[1]　謝 浩然[1]　佐藤 周平[2]　宮田 一乘[1]

概要：手書きスケッチによる複雑な流体シミュレーションのデザインは挑戦的である．本研究は，流体の構造情報を考慮し，深層学習ベース生成モデルの流体設計支援システムを提案する．本研究では，特に，2次元煙シミュレーションに着目し，手描きスケッチから流体シミュレーションをガイドするための速度場を生成する．本手法では，速度場の有限リアプノフ指数を計算し，ラグランジアンコヒーレント構造を用いて流れのパターンを分析する．生成モデルの学習データは，スケルトン抽出により構造パターンからスケッチデータを生成し，速度場や構造パターンのペアデータを構築する．本手法は，2つの条件付き敵対的生成ネットワークを用いて，スケッチデータと構造パターン，構造パターンと速度場のペアデータで学習し，最終的に手書きのスケッチから速度場を生成する．既存研究と違い，本研究は流れのパターンに基づいて流体シミュレーションが駆動するため，渦閉じ込めといった乱流の追加が可能となる．評価実験では，被験者が提案インターフェースを体験しアンケート調査を実施した．スケッチ入力でユーザの意図に沿う煙シミュレーションを設計可能であることを検証した．

1. はじめに

今日の流体シミュレーションは，流体力学に基づいた物理シミュレーションによって現実的な動きの再現に成功している．一方で，デザイナーが望むような動作をする流体シミュレーションを生成することはあまり簡単なことではない．また，時間とともに動的に変化する非線形な流れの制御は，専門的な知識を持ったユーザによって時間をかけて念入りに調整する必要がある．ユーザ指定のキーフレームに基づいて流体形状を変形させるために最適化問題によって適切な外力を求める手法が存在するが，最適化問題を解くために大きな計算時間が掛かる問題がある．さらに，高解像度シミュレーションは計算コストが高く，パラメータや境界条件をインタラクティブに調整していくことは現実的ではない．シミュレーションの解像度と計算時間はトレードオフの関係にあるため，低解像度シミュレーション上でパラメータの調整を行い，高解像度シミュレーションに反映させるという手法は一般的に思いつく考え方であるが，解像度の変化によって流体の動作は大きく変化してしまう問題がある．こういった問題は，専門的な知識を持たないユーザ，一般的にはアニメーターや流体シミュレーションに興味のあるユーザにとっては切実な悩みの一つである．比較的高速に設計と結果のサイクルを回すことのできる手法は，デザインの利便性を大きく向上させることができるだけでなく，流体技術の使いやすさによって教育といった観点への貢献も可能であると考えられる．

本研究では，入力されたスケッチデータからラグランジアンコヒーレント構造（Lagrangian Coherent Structure（LCS））を生成することで流れのパターンを定義する．LCSとは，流体の主要な流れを表し，ベクトル場における物体の輸送経路を明らかにするものである．また，本研究は，条件付き敵対的生成ネットワーク（Conditional Generative Adversarial Network（cGAN））を用いて入力されたスケッチを条件としてLCSの生成を行う．LCSは，流体内の一定期間内における非常に近い粒子の分離率を表す有限時間リアプノフ指数（Finite-Time Lyapunov Exponent（FTLE））場の極値の尾根部分として表される．このFTLEは計算点に配置された粒子を積分区間内の速度場によってトレースし，終了時の粒子位置の変化量に基づいて計算される．したがって，LCSと速度場の間にはFTLE場を仲介とした関係があり，cGANを用いてLCSを条件として速度場の生成を行う．2つのcGANのモデルを用いることで，入力されたスケッチからLCS領域と速度場を生成することが可能である．Yuanら[29]の手法によれば，流体シミュレーションはLCS領域を用いることで設計および保存された流れの特性に従うことが保証されるとしている．LCS

[1] 北陸先端科学技術大学院大学
[2] 富山大学

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

と速度場は，訓練されたモデルによって生成されるため比較的高速なサイクルで試行錯誤を行うことが出来る．本研究では，提案システムの評価を行うために提案システムに関する評価実験を行い結果を示した．評価実験は，被験者に提案システムを使用して，指定した煙シミュレーションの作成と自由なシミュレーションの作成の２つのタスクを行ってもらった．終了後に SUS（System Usability Scale）と NASA-TLX を用いてアンケート調査を実施した．

2. 関連研究

Stam[21] は，今日の流体シミュレーションに広く使われている無条件に安定した流体ソルバを提案した．その後，多くの研究者によって，このアルゴリズムは改良されている [5], [20]．しかし，ユーザは望みの流れを生成するために，パラメータ調整とシミュレーションの実行を繰り返す必要がある．この問題を解決するために，制御力の最適化や物理ベースの後処理法が考案されている．Treuille ら [25] は，ユーザ指定のキーフレームを実現するために準ニュートン法を用いて最適な外力の計算を行った．Tang ら [24] は，高解像度シミュレーション上での制御力の最適化におけるパラメータ空間の制約の欠如と高次元性に対処した．Rasmussen ら [15] は，制御粒子を通じて流体速度の制御する手法を提案した．Sato ら [18] は，既存のシミュレーションデータを用いてエネルギー関数の最小化問題として流れの制御手法を提案した．

複雑流体シミュレーションに関して，乱流構造は有限リアプノフ指数 (FTLE) の尾根部分として表されるが，この考え方は Haller によって導入された [9]．一方で，LCS は，FTLE の尾根付近における値の変化に敏感であり，目的の LCS に対して領域が細かく分かれてしまう問題ある．これは，FTLE 計算における数値計算上のバックトレースや補間の不正確さによって生じるノイズによるものである．このような問題に対して，Ferstl ら [6] は 2 次元 FTLE における実用的なアルゴリズムを提案した．この手法は，尾根付近の曲率の変化に対して微小の余裕を持たせることでノイズによる FTLE の小さな差を吸収することで，領域が細かく分割される問題に対処している．また，Yuan ら [29] は，低解像度の流れから LCS を抽出することで，高解像度シミュレーションの流れを低解像度の流れに基づいて制御する手法を提案した．同様に，Sato ら [17] は流れ関数の最小化問題を用いて低解像度シミュレーションの高解像度化手法を提案した．Xie ら [26] は流体のポテンシャル関数を用いて乱流影響の事前計算手法を提案した．本研究では，スケッチ入力を用いて流体の主要な流れをガイドしつつも流れの自然さを損なわない手法を提案し，流れのパターン構造を示す LCS 構造に着目している．

敵対的生成ネットワーク (cGAN) ベースの流体研究は近年，多くの研究がされてきている．Ladicky ら [14] は，各フレームの加速度を推定することで当時の位置ベースシミュレーションと比較して 1〜3 桁の速度向上を実現させた．Xie ら [27] は，cGAN を使用することで粗い煙シミュレーションの単一のフレームから高解像度フレームの生成を行った．また，スケッチに関連する cGAN を用いた研究も存在している．Hu ら [12] は，流体設計のためのインタラクティブなユーザインタフェースを導入し，cGAN によって得られた速度場に基づいて流体シミュレーションを生成した．Yan ら [28] は，没入型バーチャルリアリティ環境を用いて 3D スケッチを利用し，cGAN によって液体のスプラッシュ表現を生成した．本研究では，スケッチの入力による LCS の生成及び LCS の入力による速度場の生成を行うために 2 つのモデルについて訓練を行う．このモデルは，Isora ら [13] によって提案された学習モデルに基づいて設計されている．

3. ガイド付き流体シミュレーション

3.1 流体シミュレーション

流体シミュレーションの目的は，時間 t における水や煙といったシミュレーション対象の物質の密度分布を求めることである．これらは，速度場 $\mathbf{u}$ や圧力場 p によって移流される．初期時間 $t = 0$ における速度場 $\mathbf{u}$ と圧力場 p が既知であるとすると，これらの量の時間による変化は，式 2 に示すナビエ・ストークス方程式によって得られる．

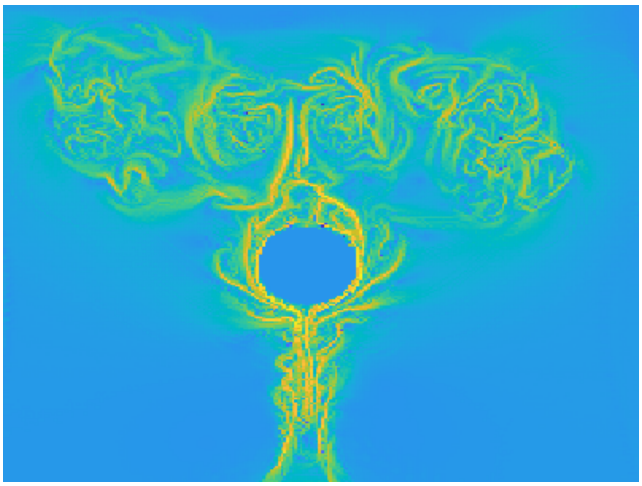
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \tag{2}$$

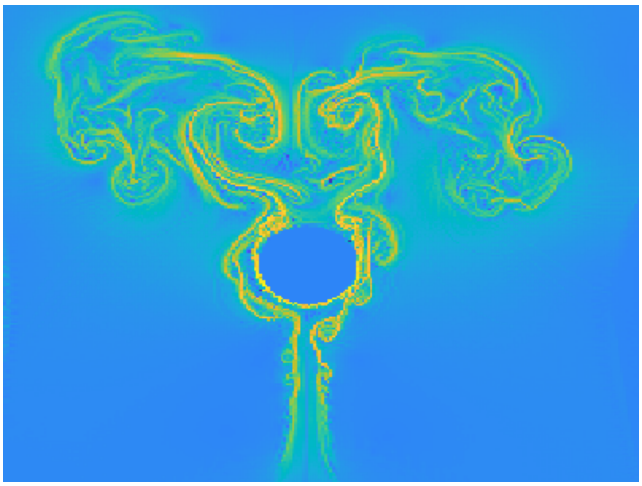
$$\mathbf{f} = \alpha \mathbf{z} + \mathbf{F}(\mathbf{p}) \tag{3}$$

ここで，ν は動粘性係数，ρ は密度，$\mathbf{f}$ は外力である．また，外力は式 3 によって計算される．第一項目は，浮力であり $\mathbf{z} = (0, 1)$ である．α は正の定数であり，$\alpha = 0.025$ を使用した．第二項目は，ガイド力でありセクション 3.6 で解説する．ナビエ・ストークス方程式は，流体が質量 [式 1] と運動量 [式 2] の両方を保存することによって得られる．

一方で，計算機において流体のような連続体を扱うためには，離散化を行う必要がある．この離散化は大きく 2 つの手法に分けられ，連続体を小さな粒子の集合体として捉える粒子法と，シミュレーション場全体を小さな格子で分割する格子法が存在する．どちらの手法においても，ナビエ・ストークス方程式の各項の力を計算していくことによって速度場を計算できるが，格子法に関して右辺第一項の移流項の計算が不安定になる可能性がある．これは，移流項が物質以外に速度自体を流すことを示しており，粒子法では粒子自体が移動することで移流項を計算するのに対して，格子法では数値的に計算する必要があるからである．この問題は，移流項の場合にのみ粒子を用いるセミラグランジュ法 [21] によって解決されているが，数値拡散の大き

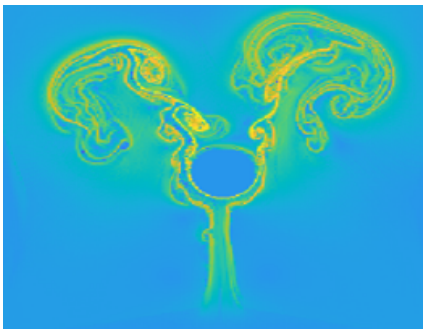


(a) 前方方向積分された FTLE 場



(b) 後方方向積分された FTLE 場

図 1: 積分方向による FTLE 場の違い



(a) 元となった FTLE 場

(b) ヘッセ行列による LCS

(c) 閾値による LCS

図 2: 抽出手法による LCS の違い

さに問題があった．本研究では，MacCormack 法 [19] を用いることで数値拡散を抑制しつつ，格子法によるシミュレーションを行う．

3.2 有限リアプノフ指数（FTLE）

リアプノフ指数とは，ごく接近した軌道の分離率を計る指数である．流体領域内のラグランジアン粒子の運動について，その軌道は常微分方程式 [式 4] で表現される．

$$\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{p}(t), t) \tag{4}$$

ここで，$\mathbf{p}(t)$ は時間 t での粒子の位置，$\mathbf{u}$ は速度である．粒子を初期位置 t_0 から積分時間 T だけ進めた軌道は以下のようなフローマップ [式 5] で定義される．

$$\Phi_{t_0}^{t_0+T}(\mathbf{p}) := \mathbf{p}(t_0 + T) \tag{5}$$

フローマップは，Cauchy-Green 変形テンソル [式 6] を用いて局所的な変形量が計算される．

$$\Delta := \frac{d\Phi_{t_0}^{t_0+T}(\mathbf{p})}{d\mathbf{x}}^* \frac{d\Phi_{t_0}^{t_0+T}(\mathbf{p})}{d\mathbf{x}} \tag{6}$$

ここで，M^* は M の転置を表す．Δ は，2 D の流れの場合は 2×2，3 D の流れの場合は 3×3 の行列である．FTLE 値は，行列の最大固有値 λ_{max} を用いて，時間依存のスカラー量として定義される [式 7]．

$$\sigma_{t_0}^{T}(\mathbf{p}) = \frac{1}{|T|} \ln \sqrt{\lambda_{max}(\Delta)} \tag{7}$$

3.3 前方移動および後方移動における FTLE

有限リアプノフ指数の計算における積分時間 T は，正負の数のいずれかとして使用される．したがって，流体領域内のラグランジアン粒子も軌道に沿って時間の経過とともに前方または後方に移動する．移動方向における FTLE 場の違いを**図 1** に示す．$T > 0$ の場合は，ラグランジアン粒子は前方に移動し，その FTLE の極大値は流れの反発する地点を示す．$T < 0$ の場合は，ラグランジアン粒子は後方に移動し，その FTLE の極大値は流れの収束する地点を示す．本研究では，後方移動から得られる FTLE を用いて流れの収束する地点を求め，主要な流れを抽出する．これは，後方移動における FTLE はその値が大きいほど流れが収束することを意味し，その極大値は対象の流れの主要な部分を示すからである．

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

3.4 ラグランジアンコヒーレント構造（LCS）

ラグランジアンコヒーレント構造（以下，LCS）は，通常では見えない流体の主要な流れを明らかにし，流体の反発または収束する構造を示す．LCS は，計算された FTLE 場の極大値の尾根部分を抽出することによって求められ，計算にはヘッセ行列が用いられる．

LCS の尾根では，ヘッセ行列の最小固有値 π_{min} とそれに関連する固有ベクトル $\mathbf{n}$ について，$\pi_{min} < 0$ および $\nabla(\sigma_{t_0}^T) \cdot \mathbf{n} = 0$ を満たす．しかしながら，このような正確な計算によって，尾根は FTLE の小さな変動に対しても鋭く反応してしまい，領域が細かく分離してしまう問題が生じた．Ferstletal ら [6] は，最大曲率閾値 κ を導入し，尾根の条件を最大固有値 $\pi_{max} < \kappa$ へと緩めることで FTLE の微小変動を吸収した．この研究によって，ヘッセ行列を用いた実用的な LCS 尾根計算が可能であり，連続した尾根を求められるが，領域が細かく分離してしまいスケルトン化には適さなかった．ヘッセ行列と閾値による LCS 抽出画像を**図 2** に示す．一方で，FTLE 場を一定の閾値で抽出する手法では良好な結果が得られたが，各 FTLE 場によって最適な閾値が異なるため同一の閾値による LCS 抽出ではデータセット生成段階で問題が生じた．したがって，本研究では混合ガウスモデルを用いて各 FTLE 場に対し最適な閾値を求める．

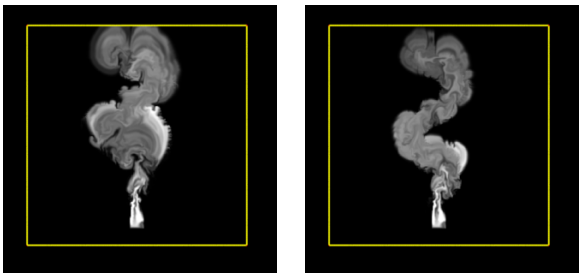
3.5 混合ガウスモデル

計算された FTLE 場から LCS を抽出するために混合ガウスモデル（Gaussian Mixture Model（GMM））を用いる．混合ガウスモデルは，クラスタリング手法の一つであり，与えられたデータから複数の正規分布にクラス分けする．本研究では，FTLE 場から 2 つにクラス分けを行い，各クラス平均値の大きい方，つまり FTLE の尾根部分が含まれている正規分布の平均値を閾値として使用した．また，FTLE 場は積分計算の過程で生じるノイズが含まれているため，クラスタリングの前にガウシアンフィルタを適用している．

3.6 ガイド力の計算

流体シミュレーションは，シミュレーションの解像度の変化や乱流の追加によって流れの挙動が大きく変化する．この問題に対応するために，Yuan ら [29] によって LCS を用いたガイド付きシミュレーションが提案された．本研究では，Yuan らの手法をベースにモデルから生成された速度場を用いてガイド付きシミュレーションを行う．

実行される流体シミュレーションは，ガイドに用いられる速度場の LCS 領域 Ω に基づいて，速度場をガイドする領域が決定される．点 $\mathbf{p}$ におけるガイド力 $\mathbf{F}(\mathbf{p})$ は以下のように計算される．



(a) $c = 0.3$　　(b) $c = 0.9$

図 3: スケーリングパラメータによる煙の違い

$$\mathbf{F}(\mathbf{p}) = \begin{cases} c\frac{1}{\delta t}(\mathbf{u}_G - \mathbf{u}_S) & \text{if } \mathbf{p} \in \Omega; \\ 0 & \text{if } \mathbf{p} \notin \Omega. \end{cases} \tag{8}$$

ここで，$\mathbf{u}_G$ は生成された速度場，$\mathbf{u}_S$ はシミュレーション上の速度場である．定数 c は，ガイド力のスケーリングパラメータであり，シミュレーションがガイド力に従う程度を示す．c が小さいときは，速度場による制約が小さくなるため浮力などの外力による影響を受けやすくなる．LCS 上から離れる流体部分も存在し，ぼやけた動きの煙になる傾向にある．一方で，c が大きくなると，外力の影響が小さくなるため，より鋭い動きになりやすい．これは，シミュレーションの設計段階でユーザによって調整され，一連のプロセスによって経験的に決定される．スケーリングパラメータ c による煙の動きの違いを**図 3** に示す．

4. 生成ネットワーク

流体シミュレーション生成において重要な課題は，流れの自然さを損なうことなくユーザが望む流れの形状を生成することである．本研究の目的は，スケッチ入力から自然な流れになるような速度場を生成することである．本研究の概要を**図 4** に示す．データセットにおけるシミュレーション結果の速度場からラグランジアンコヒーレント構造（以下，LCS）を抽出し，スケルトン化によってスケッチデータを生成する．2 つの条件付き敵対的生成ネットワーク（以下，cGAN）によって，速度場と LCS，LCS とスケッチデータの関連性を学習し，スケッチ入力から自然な流れの速度場を生成する．訓練されたモデルを用いることで，一連のプロセスによってスケッチデータから速度場を生成できる．シミュレーションは，生成された LCS と速度場によって主要な流れ部分にのみ制御力が働き，入力されたスケッチに従って煙の挙動を制御できる．LCS と速度場の生成は 1 秒以下の短時間で行えるため，ユーザは望みの煙の挙動が得られるまで，繰り返し試行錯誤を行うことが出来る．

4.1 スケルトン抽出

抽出された LCS からスケルトン抽出を行い，疑似的な

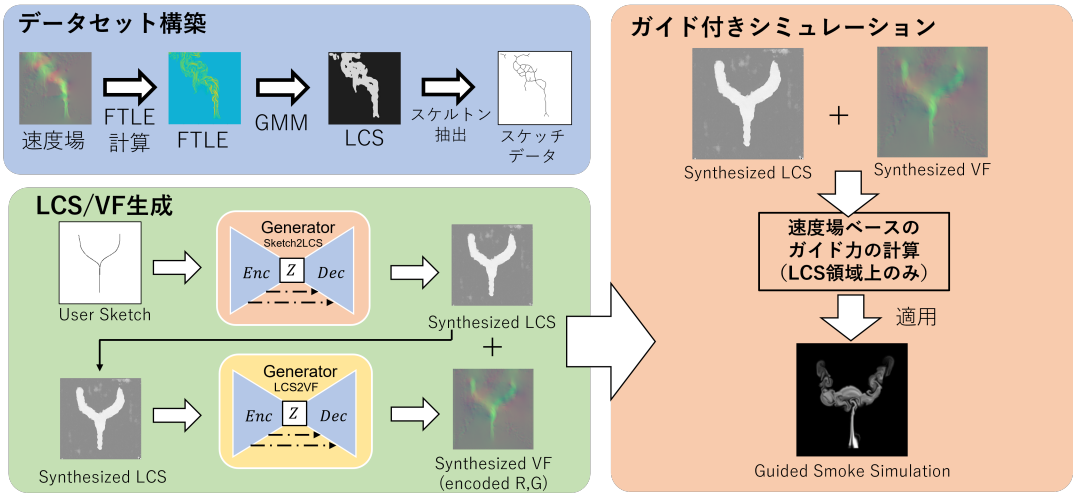


図 4: 提案手法の概要

スケッチデータを生成する．スケルトン抽出において重要な点は，入力された 2 D 形状のトポロジ構造と，元の形状の幾何学的特徴を保持することである．スケルトン抽出の関連研究は，2 D から 3 D まで，過去数十年において多くの研究が行われてきた [2], [23]．一方で，スケッチデータ生成において重要な点は，シンプルで滑らかな線が生成できること（微小なブレなどが無い，機械的に生成された線でない），不必要な線（ひげ）などが生成されないことなどが挙げられる．スケルトン抽出手法は，角があり滑らかでないようなアーティフィシャルな線が生成される手法や生成された枝の剪定といった後処理が必要な手法も存在し，そのような問題が発生する手法は適さないと考えられる．本研究では，Gao ら [7] の手法を用いる．Gao らの手法は，スケルトン抽出に用いられる二次元画像について，輪郭部分への熱源を配置及び抽出領域外への伝播を遮断し，熱シミュレーションを進めることによって得られる温度マップの尾根を抽出することでスケルトンを抽出する．

4.2 データセット構築

FTLE は，積分区間 T の間の速度場を用いて配置されたラグランジアン粒子がトレースされ，その変形量を用いて計算される．2 D 流体において，格子点 (i,j) ごとに，4 つの粒子が $\mathbf{p}_{left}=(i-\tau,j)$,$\mathbf{p}_{right}=(i+\tau,j)$,$\mathbf{p}_{down}=(i,j-\tau)$,$\mathbf{p}_{up}=(i,j+\tau)$ に配置される．ここで τ は微小距離である（本論文では，単位格子長さ 1 に対して 0.1 を使用）．4 つの粒子は各フレームの速度場を用いて積分区間 T でトレースされる．トレースされた粒子をそれぞれ $\mathbf{p}'_{left}$，$\mathbf{p}'_{right}$，$\mathbf{p}'_{up}$，$\mathbf{p}'_{down}$ として，式 6 は数値的に計算される．

$$\frac{d\Phi_{t_0}^{t_0+T}(\mathbf{p})}{d\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \frac{x(\mathbf{p}'_{right})-x(\mathbf{p}'_{left})}{2\tau} & \frac{x(\mathbf{p}'_{up})-x(\mathbf{p}'_{down})}{2\tau} \\ \frac{y(\mathbf{p}'_{right})-y(\mathbf{p}'_{left})}{2\tau} & \frac{y(\mathbf{p}'_{up})-y(\mathbf{p}'_{down})}{2\tau} \end{pmatrix} \tag{9}$$

(a) スケッチデータ　(b) LCS　(c) 速度場

図 5: 学習に使用された訓練データ

最終的に FTLE は，式 6 の最大固有値から式 7 を計算することによって求められる．トレースには 4 次のルンゲクッタ法を使用し，線形補間を用いて粒子位置の補間を行った．計算された FTLE 場は混合ガウスモデルによって 2 つの正規分布に分類され，LCS はそれらの閾値をもとに計算される．

学習に用いられるスケッチデータは，LCS をスケルトン抽出することによって作成され，訓練データを用いてスケッチ・LCS 間及び LCS・速度場間をマッピングするモデルが学習される．訓練データの一例を**図 5** に示す．訓練データは，シミュレーションによって生成された速度場とそこから計算された LCS，及び LCS から抽出されたスケルトンデータによって構成される．本研究では，Isora ら [13] によって提案されたモデルを用いて学習を行った．ユーザによって入力されたスケッチからスケッチ・LCS 間のマッピングが学習されたモデルを用いて LCS が生成され，また，生成された LCS から LCS・速度場間のマッピングが学習されたモデルによって速度場が生成される．

4.3 ユーザインタフェース

提案システムは，スケッチ入力によって流体をデザインするスケッチ UI とシミュレーションを通してデザインされた流体シミュレーションを確認できるシミュレーション UI で構成する．流体シミュレーションは mantaflow ソフト

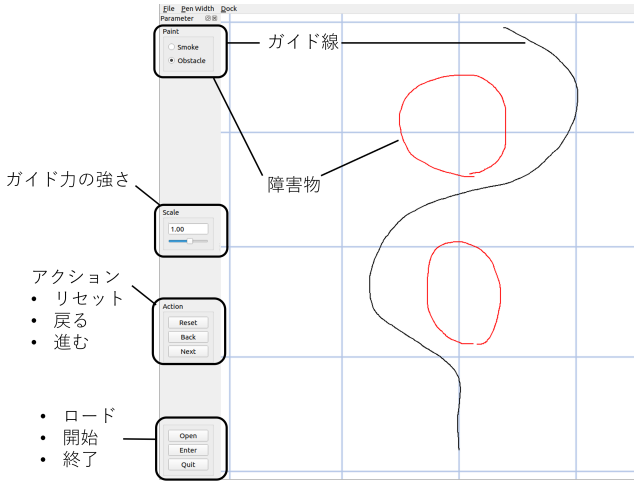


図 6: 提案インターフェース

ウェアフレームワーク [1] によって実装されており，シミュレーション UI も mantaflow の GUI に準ずる．mantaflow は，C++によって実装された流体シミュレーションフレームワークである．煙をはじめ，水や炎のシミュレーションを 2D 及び 3D で簡単に実装できる．シミュレーションは格子法がベースとなっているが，移流計算にのみセミラグランジュ法を使用している．スケッチ UI は，スケッチに必要な機能（戻る，進む，リセットなど）の他に，スケッチとシミュレーション確認のプロセスの繰り返しによってスケッチの改善を行うために，保存されたスケッチのロードが可能である．項目 Paint は，ガイド (smoke) と障害物 (obstacle) の線を切り替えるラジオボタンであり，それぞれの線はガイドが黒，障害物が赤で示される．項目 Scale は，ガイド力の強制度を変更するためのスケーリングパラメータを調整できる．項目 Action は，スケッチに関連する機能を使用できる．最後の項目は，画面遷移の機能である．それぞれ，Open は過去のスケッチデータをロードでき，Enter はシミュレーション確認画面への遷移，Quit はシステムを終了することができる．提案されたユーザインタフェースを**図 6** に示す．

4.4 実装

提案されたユーザインターフェースは，PyQt によって実装され，流体シミュレーションは mantaflow フレームワークで駆動する．スケッチ・LCS 及び LCS・速度場をマッピングする cGAN モデルは，RTX3090 と Intel Xeon W-2223@3.60GHz で訓練された．cGAN に用いられた生成器は，Ronneberger ら [16] によって提案された U-net に基づいており，識別器には Isora らによって提案された PatchGAN[13] を使用している．

本研究は，バッチサイズ=64，エポック数=100 で学習された．データセットは，1374 の訓練データと 344 のテストデータで構築されている．これらは，mantaflow フレームワークによって速度場が計算され，FTLE の計算，LCS 抽出，スケルトン抽出の工程を経て生成された．最適化アルゴリズムは，生成器と識別器のどちらにも Adam を使用し，学習率=0.0002 である．

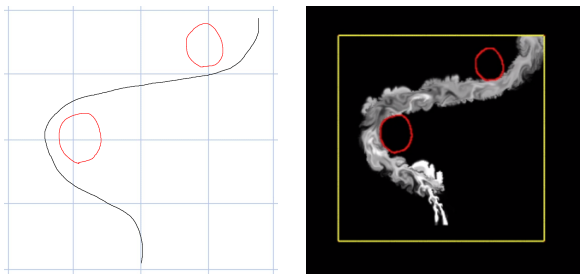
データセット構築のためのシミュレーションは，x 軸がランダム・y 軸が固定座標で湧き出し位置が決定され，中央に一様なランダム方向への正方形領域の速度場が配置された環境で実行される．この速度場と湧き出し位置によりシミュレーション毎の流れがよりランダムになり，データの幅が出来る．シミュレーション領域とその外界は壁で隔てられておらず吹き抜けの状態である．浮力は 0.025 を使用した．シミュレーション間隔は $\Delta t = 0.1$ であり，100 秒分つまり 1000 フレームのシミュレーションが実行される．訓練データとして使用される速度場は 1000 フレーム地点のものであり，FTLE は 1000 フレーム目からの後方移動の FTLE を計算し，積分区間は $T = 2.5$ つまり 25 フレームである．混合ガウスモデルの標準偏差は，$\sigma = 1.0$ を使用した．

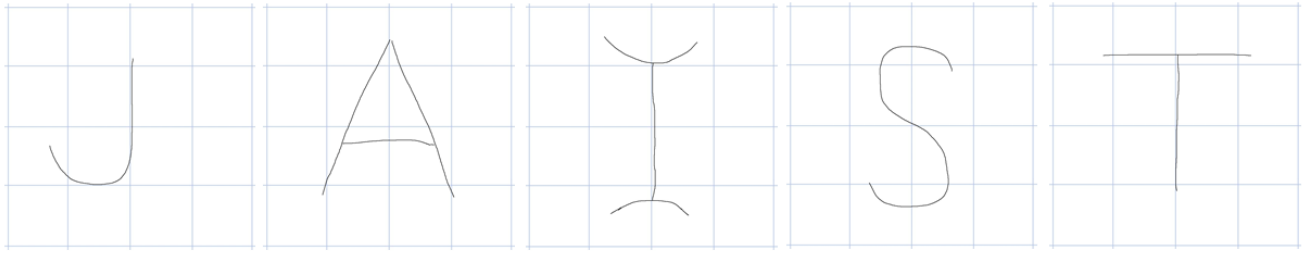
5. ユーザスタディ

システム評価のためのユーザ実験を行った．実験では，20-35 歳の男女計 10 人に対してシステムを利用してもらい，最後に SUS(System Usability Scale) と NASA-TLX を用いてアンケート調査を実施した．各アンケートにおけるそれぞれの手法及びスコア計算の仕方は以下の論文に準拠している [4], [10]．実験は，煙の設計の容易性や設計できる煙の多様性を測るために以下の A，B に分かれている．

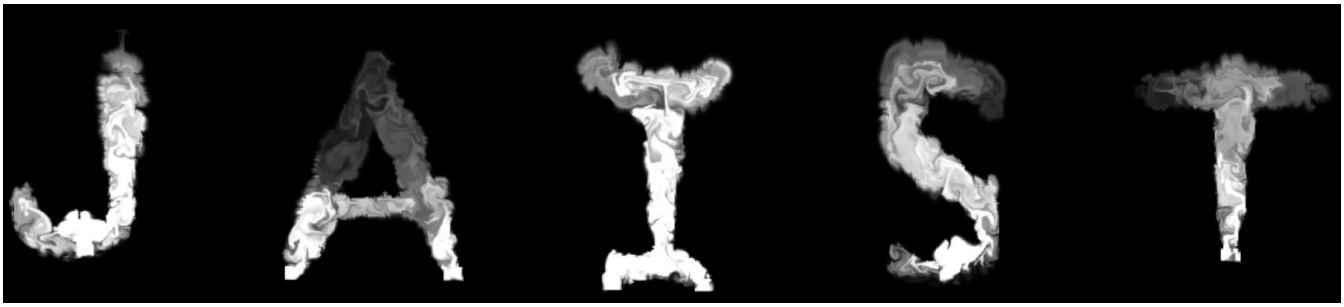
実験 A：最初に被験者に，著者側であらかじめ作成した煙シミュレーションを視聴してもらう．この煙シミュレーションは実験中にいつでも視聴できるような状態にある．被験者には，視聴した通りの挙動をする煙シミュレーションを作成してもらう．実験 A に用いた煙シミュレーションのスケッチ画像と 1 フレーム画像を**図 7** に示す．
実験 B：自由な煙シミュレーションを作成してもらう．

実験手順としては，まず，提案システムの説明を行う前に，


(a) スケッチ画像　(b) シミュレーション画像
図 7: 実験 A に使用された煙シミュレーション



(a) 手書きスケッチ



(b) シミュレーション結果

図 8: 文字「JAIST」

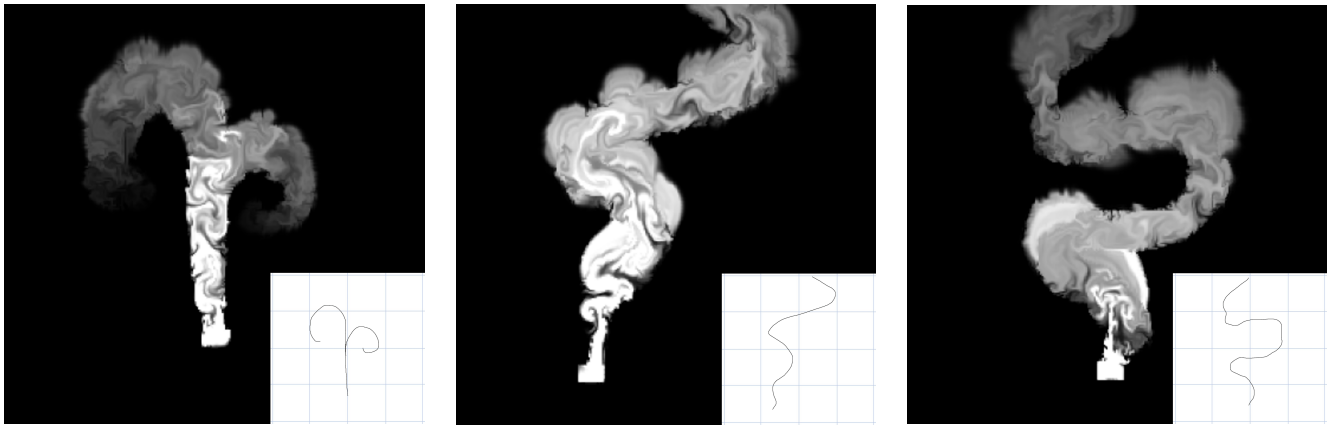


図 9: ガイド付きシミュレーションの例

NASA-TLX の練習を行った (2 分)．次に，被験者には本研究の主旨や提案システムの説明を行い，数分間の練習時間を設けた (計 5 分)．提案システムの説明については，最初に本研究が流体の大まかな流れに焦点を当てており，スケッチによって流体の主要な流れを設計できることを説明した．続いて，ユーザインターフェースを著者が実際に機能を使用することにより説明し，一連の説明終了後，被験者が納得するまで練習時間を設けた．その後，実験 A⇒B の順番にどちらも 3〜10 分という制限時間を設けて行った (計 20 分)．どちらの実験でも，被験者が考える努力等をせずに実験を終了することを防ぐために最初の 3 分間を試行錯誤時間として課している．最後に，SUS⇒NASA-TLX の順番でアンケートを実施し，終了後に提案システムに関する自由なコメントを求めた (5 分)．

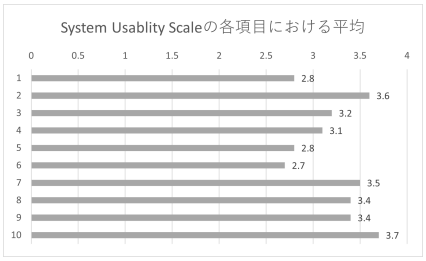
6. 結果

6.1 ガイド付き流体シミュレーション

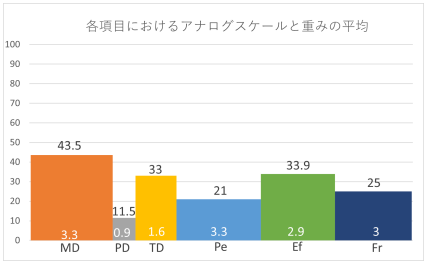
学習されたモデルを用いた LCS・速度場の生成速度に関しては，簡単なスケッチと複雑なスケッチについて，モデルのロードやテンソルの整形を済ませた上で，モデルにテンソルを入力してから生成までの時間を計測した．結果は，大きな差は開くことなくどちらもスケッチ ⇒LCS の生成時間が 8ms，LCS⇒ 速度場の生成時間が 3ms 程度であった．

図 8 にスケッチから文字を生成したシミュレーション結果を示す．煙の生成位置や流れ方を考えてデザインすることで一筆書きの文字に限らず，様々な文字を生成することが可能である．また，**図 9** に，様々な形状のスケッチ画像とそれに関連するシミュレーション結果を示す．基本的

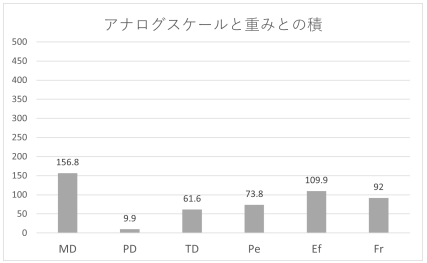
ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan



(a) SUS の結果



(b) TLX におけるスケールと重みの平均



(c) TLX におけるスケールと重みの積平均

図 10: 各アンケート結果

に，下から上への一本線で描かれたスケッチについては，速度場が乱れることなく煙が流れていることが分かる．ただし，カーブ部分において煙が溜まっている場所も存在する．これは浮力とガイド力によって勢いのついた煙が曲がり切れずガイド力領域が外れることで，うまく流れることが出来ていないと考えられる．また，手描きスケッチ内に複数線が存在した場合に正しい速度場が生成されない場合もある．これはスケッチから LCS を生成する際にスケッチ同士がある程度離れていないため近い線同士の LCS が繋がってしまい，LCS の形状から予想とは異なる速度場が生成されたと考えられる．

6.2 ユーザスタディ

アンケート結果を**図 10** に示す．SUS の総和平均の結果として，上限値が 95 点，下限値が 60 点，平均値が 80.5 点であった．Bangor ら [3] は，平均スコアの評価尺度として 70 点以上のスコアを許容範囲内，80 点以上を良好なスコアとしている．また，GUI のインターフェースタイプにおける SUS 平均スコアが 76.2 点であることや，273 のアンケート結果における四分位数では上位四分の一が 77.8 点以上であることが述べられており，このことから SUS 平均スコアの結果としてはインターフェースが良好であることが分かる．

各アンケート項目について検討すると，項目 10 及び 2 のスコアが高い値を示し，項目 6 及び 5 のスコアが低い値を示している．10 及び 2 の質問はインターフェースの使いやすさを示唆している項目であり，このことから，提案インターフェースは使いやすいと言えるだろう．これは，次点で項目 7 が高いスコアを示していることからも確認できる．

一方で，項目 6 及び 5 は，提案インターフェースの機能性について示唆している．この項目の点数が低い原因としては，インターフェースのスケッチやシミュレーション結果に関する機能不足によるものとも言えるが，煙のガイド力と障害物を書く機能が同時に存在することへの疑問を示しているとも捉えることが出来る．これは，後述するアンケート後のインタビューによって被験者から得た意見に，「障害物を書くのに，ガイド力を書く意味が分からなかった.」，「ガイド力を書くのに，障害物を書く意味が分からなった.」といったものがあり，機能の重複による統一性や一貫性に問題が生じたのではないかと考えられる．

NASA-TLX について，アナログスケール平均の中で一番評価値の大きなものは精神的要求度であり，重み平均の中で一番評価値の大きなものは精神的要求度及び作業達成度であった．

ユーザスタディは，提案システムを用いて指定された課題の作成または自由に作成することであるため，思考による精神的負荷が大きいことは自明である．それでも，アナログスケールの評価値平均が 50 を下回った点から精神的負荷が目立った負荷にはならなかったと考えらえる．重み平均についても精神的要求度に関しては同様のことが言える．

作業達成度について，アナログスケールの評価値が低い割に重み平均の評価値が大きい点は，結果の分かりやすさにあると考えられる．アナログスケールの評価値平均が低いということは，それだけ与えられたユーザスタディをこなすことが出来たと考えている被験者が多いということであるが，一方で他の項目と比較した場合には，より作業達成度が自身の精神的負荷に関わっていると考えている被験者が多いということにである．これは，結果が分かりやすいことによって出来の良さを被験者自身で判定しやすくなり，これに伴って作業達成度の重み平均が大きくなったと考えられる．

また，アナログスケール平均及び重み平均の中で一番評価値の大きなものは身体的要求度であった．これは，提案インタフェース自体がペンによるスケッチであり小さくなることは自明である．

平均作業時間は，実験 A が 6 分 07 秒，実験 B が 6 分 01 秒であった．

7. 結論と今後の展望

スケッチベースの流体シミュレーションデザイン手法を提案した．構造パターンからスケッチデータを抽出することで，手書きスケッチと構造パターンのマッピングを学習

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

し，自然な流れのガイドをするための LCS の生成が可能となった．これにより，流体シミュレーションに関して専門的な知識を持っていないユーザでも，簡単に流体シミュレーションを設計することが可能である．一方で，提案手法では，スケッチ入力によってグローバルな煙の挙動を制御できたが，流れの幅や部分的なガイド力の調整は提供されていない．また，手書きスケッチの時点で複数の線があった場合に LCS 生成時にそれらが繋がってしまい，ユーザの思いもよらない速度場が生成されてしまう可能性があった．したがって，より高精度なガイドや詳細な設計のために，ペンの幅を可変にすることなどによって LCS を直接編集できるようなスケッチ UI の開発が必要だろう．また，現在のシステムでは，ガイド力が生成された LCS 領域内すべてに対してそのまま反映されているが，部分ごとのガイド力の調整も必要であると考えられる．

提案システムでは，流れの方向を下から上へと定義付け，それをもとにスケッチ入力が行われるがより自由な流体デザインを行うためには，様々な方向への流れが可能なシステムが必要である．本研究では，使用したデータのほとんどが下から上への流れであったため，生成された速度場にもそのような特徴が出てしまっている．したがって，あらゆる方向への流れを持つデータセットによって訓練を行うことで，より柔軟性の高い流体デザインシステムを設計可能であるが，一方でそのようなシステムでは流れ方向の定義付けが必要となる．深層学習ベースの 2D スケッチから法線マップの生成を行っているが，足りない 3 次元情報について局所的に法線情報を与えることで解決している [11], [22]．流れ方向の定義付けについても，このように局所的に向きを与えることで解決が可能であると考えられる．

本研究では，2D シミュレーションの生成に焦点を当てているが，3D または 3D に変換された 2D スケッチ入力を用いることで 3D シミュレーションの生成へと拡張できると考えられる．これは，FTLE や LCS，スケルトン抽出の考え方が 3 次元へと拡張可能だからである．特に，3D モデルにおけるスケルトン抽出の研究はすでに多くの手法が存在している．また，3 次元の FLTE 計算も可能である [8]．したがって，問題となる点はスケッチの 3 次元拡張であり，没入型バーチャルリアリティ環境の導入等によって解決できると考えられる．

参考文献

[1] mantaflow. http://mantaflow.com/.
[2] Oscar Kin-Chung Au, Chiew-Lan Tai, Hung-Kuo Chu, Daniel Cohen-Or, and Tong-Yee Lee. Skeleton extraction by mesh contraction. *ACM transactions on graphics (TOG)*, Vol. 27, No. 3, pp. 1–10, 2008.
[3] Aaron Bangor, Philip Kortum, and James Miller. Determining what individual sus scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of usability studies*, Vol. 4, No. 3, pp. 114–123, 2009.
[4] John Brooke, et al. Sus-a quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, Vol. 189, No. 194, pp. 4–7, 1996.
[5] Ronald Fedkiw, Jos Stam, and Henrik Wann Jensen. Visual simulation of smoke. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 15–22, 2001.
[6] Florian Ferstl, Kai Burger, Holger Theisel, and Rudiger Westermann. Interactive separating streak surfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 6, pp. 1569–1577, 2010.
[7] Fengyi Gao, Guangshun Wei, Shiqing Xin, Shanshan Gao, and Yuanfeng Zhou. 2d skeleton extraction based on heat equation. *Computers Graphics*, Vol. 74, pp. 99–108, 2018.
[8] Christoph Garth, Florian Gerhardt, Xavier Tricoche, and Hagen Hans. Efficient computation and visualization of coherent structures in fluid flow applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 13, No. 6, pp. 1464–1471, 2007.
[9] George Haller and Guocheng Yuan. Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 147, No. 3-4, pp. 352–370, 2000.
[10] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology*, Vol. 52, pp. 139–183. Elsevier, 1988.
[11] Yi He, Haoran Xie, Chao Zhang, Xi Yang, and Kazunori Miyata. Sketch-based normal map generation with geometric sampling. In Masayuki Nakajima, Jae-Gon Kim, Wen-Nung Lie, and Qian Kemao, editors, *International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2021*, Vol. 11766, pp. 261 – 266. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2021.
[12] Zhongyuan Hu, Haoran Xie, Tsukasa Fukusato, Takahiro Sato, and Takeo Igarashi. Sketch2vf: Sketch-based flow design with conditional generative adversarial network. *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 30, No. 3-4, p. e1889, 2019.
[13] Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou, and Alexei A Efros. Image-to-image translation with conditional adversarial networks. *CVPR*, 2017.
[14] L'ubor Ladickỳ, SoHyeon Jeong, Barbara Solenthaler, Marc Pollefeys, and Markus Gross. Data-driven fluid simulations using regression forests. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 6, pp. 1–9, 2015.
[15] Nick Rasmussen, Douglas Enright, Duc Nguyen, Sebastian Marino, Nigel Sumner, Willi Geiger, Samir Hoon, and Ronald Fedkiw. Directable photorealistic liquids. In *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 193–202, 2004.
[16] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, pp. 234–241. Springer, 2015.
[17] Syuhei Sato, Yoshinori Dobashi, and Theodore Kim. Stream-guided smoke simulations. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 40, No. 4, jul 2021.
[18] Syuhei Sato, Yoshinori Dobashi, and Tomoyuki Nishita. Editing fluid animation using flow interpolation. *ACM*

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

Trans. Graph., Vol. 37, No. 5, sep 2018.

[19] Andrew Selle, Ronald Fedkiw, Byungmoon Kim, Yingjie Liu, and Jarek Rossignac. An unconditionally stable maccormack method. *Journal of Scientific Computing*, Vol. 35, No. 2, pp. 350–371, 2008.

[20] Andrew Selle, Nick Rasmussen, and Ronald Fedkiw. A vortex particle method for smoke, water and explosions. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, pp. 910–914. 2005.

[21] Jos Stam. Stable fluids. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 121–128, 1999.

[22] Wanchao Su, Dong Du, Xin Yang, Shizhe Zhou, and Hongbo Fu. Interactive sketch-based normal map generation with deep neural networks. *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–17, 2018.

[23] Andrea Tagliasacchi, Ibraheem Alhashim, Matt Olson, and Hao Zhang. Mean curvature skeletons. 2012.

[24] Jingwei Tang, Vinicius C. Azevedo, Guillaume Cordonnier, and Barbara Solenthaler. Honey, i shrunk the domain: Frequency-aware force field reduction for efficient fluids optimization. In *Computer Graphics Forum*, Vol. 40, pp. 339–353. Wiley Online Library, 2021.

[25] Adrien Treuille, Antoine McNamara, Zoran Popović, and Jos Stam. Keyframe control of smoke simulations. In *ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pp. 716–723. 2003.

[26] Haoran Xie, Takeo Igarashi, and Kazunori Miyata. Precomputed panel solver for aerodynamics simulation. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 2, mar 2018.

[27] You Xie, Erik Franz, Mengyu Chu, and Nils Thuerey. tempogan: A temporally coherent, volumetric gan for super-resolution fluid flow. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 37, No. 4, pp. 1–15, 2018.

[28] Guowei Yan, Zhili Chen, Jimei Yang, and Huamin Wang. Interactive liquid splash modeling by user sketches. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 39, No. 6, pp. 1–13, 2020.

[29] Zhi Yuan, Fan Chen, and Ye Zhao. Pattern-guided smoke animation with lagrangian coherent structure. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 30, No. 6, pp. 1–8, 2011.

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

8. 付録

8.1 System Usability Scale

System Usability Scale（以下，SUS）は，Brooke[4] によって提案された手法である．この手法は，システムのユーザビリティに関する主観的な評価を把握するために 10 個のアンケート項目が設定されており，評価実験では 5 段階のリッカート尺度を設けた．アンケート項目は以下の形式である．

(1) （煙シミュレーションの作成において）このシステムをしばしば使用したいと思う．
(2) このシステムを使用するには説明が必要となるほど複雑であると感じた．
(3) このシステムは使いやすいと感じた．
(4) このシステムを利用するには，専門家・技術者のサポートが必要だと思う．
(5) このシステムの様々な機能には統一感があると感じた．
(6) このシステムには一貫性が無いところが多いと感じた．
(7) ほとんどの人がこのシステムはすぐ使いこなせるようになると思う．
(8) このシステムは操作しづらいと感じた．
(9) このシステムを自信を持って使える．
(10) このシステムを使いこなすには事前にたくさんのことを学ぶ必要があると思う．

SUS は，回答者が質問に対して熟考することなく回答することによって引き起こされる応答バイアスを防ぐために，ポジティブな項目とネガティブな項目が交互に配置されている．この配置によって，回答者が各文章を確実に理解し，質問に対して賛成か反対かを考える努力を要求している．ただし，最終的なスコアリングは，ポジティブとネガティブの質問項目が混合しているため単純な加算では正しい結果が得られないことに注意する必要がある．SUS スコアを計算するためには，偶数番号と奇数番号のスコアに対して後処理を行う．偶数番号の質問項目はネガティブであるため，5 から項目のスコアを引いた値となる．奇数番号の質問項目はポジティブであるため，単純に項目のスコアから 1 を引いた値となる．最後に，後処理されたスコアを合計し，0〜100 で評価するために，2.5 を掛けることで得られる．

8.2 NASA-TLX

NASA-TLX（以下，TLX）は，Hart ら [10] によって提案されたメンタルワークロードの評価手法である．TLX では，メンタルワークロードの負荷測定を行うために，以下の 6 つの下位尺度が設定されている．

(1) 精神的要求度 · · · 精神的または知覚的な活動の必要度合い．
(2) 身体的要求度 · · · 身体的活動の必要度合い．
(3) 時間切迫度 · · · 作業の頻度や速度に関して，時間的な圧迫度合い．
(4) 作業達成度 · · · 指定された作業についての達成度合い．
(5) 努力度 · · · 自分の作業達成度に達するために必要な努力の度合い．
(6) 不満度 · · · 作業中のフラストレーションの度合い．

回答者には，これらの 6 つの項目について，低い/高いまたは良い/悪いの両極を持つビジュアルアナログスケールの 21 段階でそれぞれ評価させる．これは，各目盛りについて，数値として 1 点から始まり 5 点刻みで 100 点までが設定されている．TLX は，評価された下位尺度のスケールをそのまま用いるのではなく，各項目において算出された重みづけ係数を掛けることによって各項目の点数が計算される．この重みづけ係数は，6 つの下位尺度についてすべての 2 組の組み合わせ計 15 通りについて比較し，どちらの項目がよりワークロードに重要な関わりを持つかを回答者に判断させることによって得られる．ここで重要な点は，比較される 2 組の下位尺度に関してどちらのスケールの値が大きいかではなく，どちらが重要な関わりを持つかという点であり，回答者にはこの部分を確実に理解させた上で判断させる必要がある．ワークロードにおける TLX の最終的なスコアは，最初に評価した各スケールの値に各重みづけ係数を掛け，総和を取ったものを重みづけ係数の和 15 で割ることにより，重みづけされたワークロードの平均値 (WWL:Weighted Workload) が得られる．

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan