



実時間数値流体計算と嗅覚ディスプレイによる 匂い方向感の再現

Reproduction of Odor Direction Sensation by Real-Time Numerical Fluid Computations and Olfactory Displays

宇田匡郁史¹⁾, 中本高道²⁾
Masafumi Uda, and Takamichi Nakamoto

- 1) 東京工業大学 情報通信系 (〒226-0026 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, uda.m.aa@m.titech.ac.jp)
2) 東京工業大学 未来産業技術研究所 (〒226-0026 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, nakamoto@mn.ec.titech.ac.jp)

概要: 数値流体計算によってユーザーの体や、部屋の構造などの影響を加味した匂い強度をリアルタイムに計算することで、より現実に即した匂い体験を提供する。体験者の方には、この匂いを頼りに仮想空間内に存在する匂い源の方向を探索してもらう。仮想空間上の部屋には 4 方向に窓がついており、いずれかの窓から匂いが漂ってくる。体験者の方には、部屋の中心で任意の方向を向くことで匂いがどの窓から漂っているのか当ててもらおう。

キーワード: 流体計算 嗅覚 インタラクティブ性

1. はじめに

VR(Virtual Reality)は仮想環境における人の感覚を、人工的にユーザーへ提示することで、仮想環境での体験を創造する技術である。現在は、視覚、聴覚、触覚の再現が進み、今後嗅覚や味覚の再現による没入感の向上も期待されている。特に嗅覚は人間の記憶に密接な関係があるとされており、危険察知や心理面への影響など人間にとって欠かせない感覚である。

しかし、仮想空間の嗅覚提示は難易度が高い。嗅覚ディスプレイと呼ばれる匂いを提示する装置の開発では、多種の匂いを提示するための要素臭の探索や、前の匂いが嗅覚ディスプレイに残ってしまう「匂い残り」が主な課題となっている。また、仮想空間内の匂い分布を求める部分でも課題がある。

従来の研究では、匂い源からの距離によって匂い分布を決定する等方拡散モデルが広く用いられていた。しかし、このモデルは無風の環境を仮定しており、そのような状況は現実にはほとんど見られない。加えて、壁や部屋の形状の影響を反映することができない。こういった障害の影響を考慮するには流体計算(CFD: Computational Fluid Dynamics)が必要になるが、流体計算には膨大な計算が必要になる。したがって、仮想空間内の匂い分布を事前に計算し、ユーザーの位置と時間に対応する匂い強度を提示する研究[1]が行われた。この手法では事前に計算をするため、ユーザーの動きによって発生する匂い分布の変化を反映

することができない。現実で人が感じる匂いは、体温によって発生する上昇気流などの体による影響を大きく受けている。

本研究では流体計算の解像度を下げたうえで GPU による並列計算を使用することで、実時間内に流体計算を行う。これによって、人の嗅覚体験に重要な人体の影響を反映した流体計算による匂い分布を計算する。

2. ソフトの構成

CFD のプログラムは GPU を使用するため、CUDA で記述した。それに対し、VR コンテンツの作成には Unity を使用しており、C# によって動作している。したがって、以前は CFD のプログラムと VR コンテンツのプログラムは独立して動作しており、テキストファイルを介して CFD 計算に必要な情報を取得していた。しかし、テキストファイルの読み込みと書き込みを同時に行えないため、情報が欠落したり通信に時間がかかる問題があり、流体計算内と仮想空間内の物体情報には 0.1[s]-2[s] の遅延が発生していた。精度の高い流体計算を行うためには、仮想空間内の物体の形状や座標を低遅延で取得する必要がある。したがって、本研究では CFD のプログラムを DLL(Dynamic Linking Library) として Unity へ統合した。これによって、Unity におけるフレームレートと同じ周波数で物体情報を取得することが出来るようになった。通常の設定でのフレームレートは約 60fps であるため、流体計算における物

体情報の更新も約 60fps となっている。

以下の図 1 に実時間数値流体計算 VR プログラムの全体構成を示す。VR コンテンツが開始されると同時に Unity 側から CFD プログラムを呼び出す。CFD プログラムは「仮想空間内の時刻」と「仮想空間内の物体の位置や形状の情報」が保存されるメモリを参照しながら並列に動作する。テキストファイルを介する場合は異なり、VR プログラムから CFD プログラムを制御するため、メモリの競合が発生しない。CFD の計算は取得した仮想空間内の時刻に達するまで行われ、ユーザーの鼻周辺の匂い濃度を算出し、メモリに保存する。VR プログラムはメモリに保存された匂い濃度を参照して、嗅覚ディスプレイへ動作信号を送る。

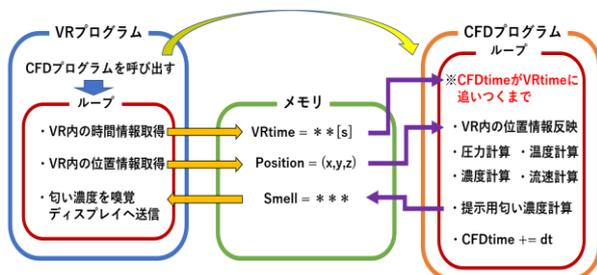


図 1: 実時間数値流体計算 VR プログラムの全体構成

3. 嗅覚ディスプレイの概要

本研究では以下の図 2 に示す高速電磁弁開閉型嗅覚ディスプレイを使用した。[2]



図 2: 高速電磁弁開閉型嗅覚ディスプレイと HMD

この嗅覚ディスプレイは 12 種類の液体香料のヘッドスペースの気体と空気を混ぜることで、匂いの種類と強度をリアルタイムで操作することができる。匂いはポンプによってチューブを通して出力している。出力する匂い割合はシリアル通信によってコンピュータで制御し、匂いの相対濃度は 0~100% の間で設定することが出来る。

4. シミュレーション結果

この章では本研究で使用している CFD 計算プログラムによる計算結果について整理する。

4.1 Ansys@Fluent@2020R1 との比較

まず、本シミュレータにて既存の流体計算ソフトと同様の結果が得られるかどうかの検証を行った。ここでは市販ソフトウェア Ansys@Fluent@2020R1(以下 Ansys) による計算結果との比較を行った。なお、本シミュレータの計算には NVIDIA GeForce RTX 4090 を使用し、Ansys の計算には NVIDIA GeForce RTX 3090 を使用した。解析領域は $5.8[m] \times 2.7[m] \times 3.2[m]$ の一部屋に窓と解放されたドアが設置されている。(図 3) また、格子数やタイムステップ数の設定は以下の表 1 に示す。

表 1: 格子とタイムステップ

	本シミュレータ	Ansys
格子サイズ[cm]	5.0	3.5
格子数[個]	394632	1116525
タイムステップ[s]	1.25×10^{-3}	0.1

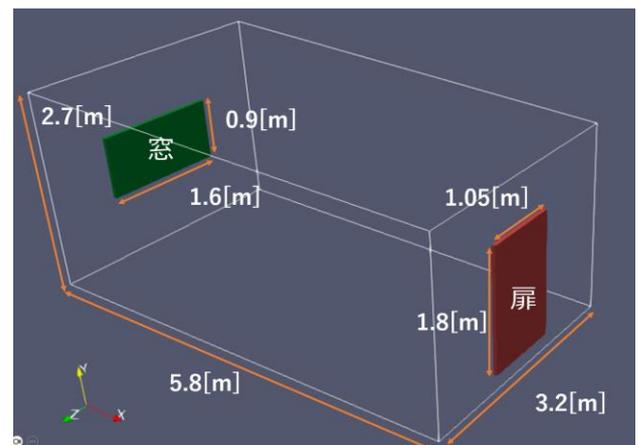


図 3: 計算領域

室温は $20[^\circ\text{C}]$ に設定しており、窓からは $10[^\circ\text{C}]$ の空気が $1[m/s]$ で吹き込んでいる。計算開始から 5 秒後の Ansys による速度ベクトルの計算結果を以下の図 4 に示す。

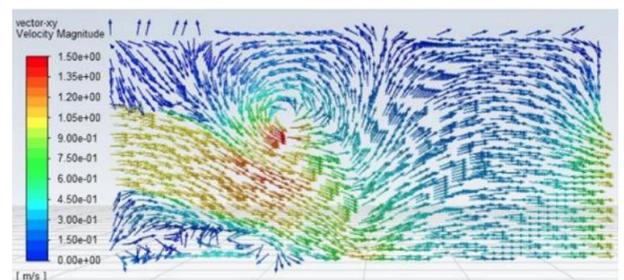


図 4: Ansys による計算結果

図 4 は部屋の中心を通る xy 平面を描画している。左

側の窓から風が吹き込み、冷風のため床付近へ向かっていることが分かる。次に本シミュレータによる速度ベクトルの計算結果を図5に示す。

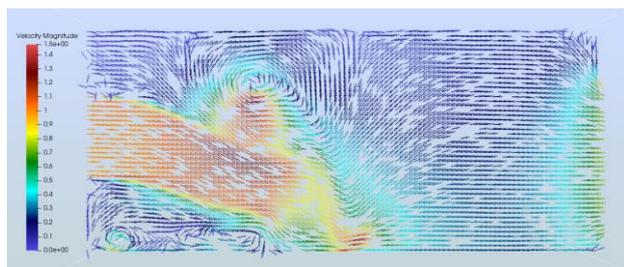


図5：本シミュレータによる計算結果

Ansys による計算結果と比較すると若干の違いがみられるが、部屋の左上部分で渦が形成されており、定性的には同様の結果が得られている。

4.2 方向感提示コンテンツでの流体計算

匂いによる方向感を提示するために、4方向に窓が設置された部屋の中心で匂い源の方向を探し当てるコンテンツを作成した。従来の方法では体験者自体の人体の影響を考慮できないが、実時間流体シミュレーションでは考慮可能である。そこで人体が流体場に与える影響を調べた。このコンテンツではユーザーは歩くことができず、部屋の中心で任意の方向を向くことしかできない。また、ユーザーの体は、32[°C]の直方体(0.4[m]×1.7[m]×0.15[m])として表現している。以下の図6に計算開始から100秒後の匂い濃度分布を示す。ただし、この時人体モデルは静止しているものとして計算した。

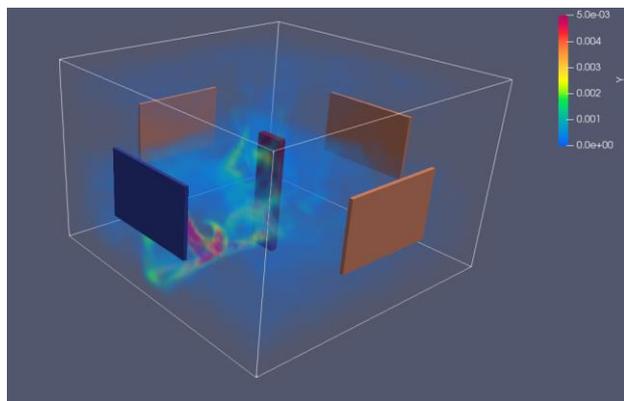


図6：100秒後の匂い濃度分布(人体モデル有り)

室温は20[°C]で設定しており、青色の窓からは10[°C]の風が0.2[m/s]で吹き込んでいる。また、匂い源は青色の窓の前に設定した。人体モデルは周りの温度よりも高いため、上昇気流が発生し、匂いは人体モデルに這うように立ち上っている。したがって、ユーザーが匂い源の窓を向いた時と、そうでない時でユーザーの鼻付近の匂い濃度に大きな差ができる。

次に人体モデルを計算に含めないで同様の計算を行った。この場合の匂い分布を以下の図7に示す。図7中央部

の直方体は人体位置を確認するために置いたが、計算はそこに人体モデルがないものとして行っている。

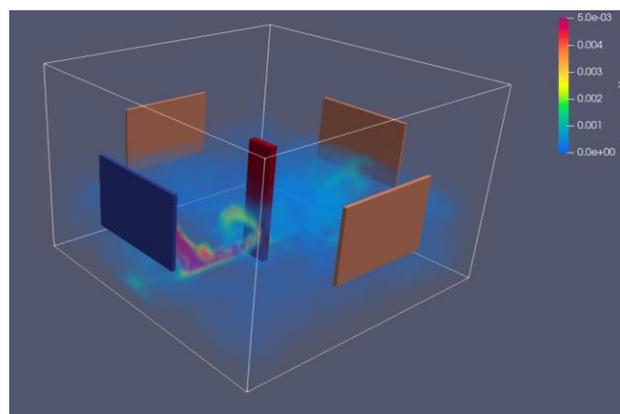


図7：100秒後の匂い分布(人体モデル無し)

人体モデルを計算に入れた場合に比べて、匂いが床の付近に停滞している。そのため、ユーザーの鼻付近には殆ど匂いが届かず、体の向いている方向による匂い濃度の差も小さい。

4.3 実験

嗅覚再現による方向感の提示を確かめるため、本コンテンツを用いた実験を行った。本実験は前報[3]の内容を発展させたものである。これに合わせて作成したVR空間の画像を以下の図8に示す。実験では、人体モデルがある場合とない場合の両方で匂い源を回答してもらった。実験は18人の被験者に対して行い、回答に加えて自分の回答に対して確信があるかどうかについても質問した。この実験において匂い源はBの窓の前に設定した。

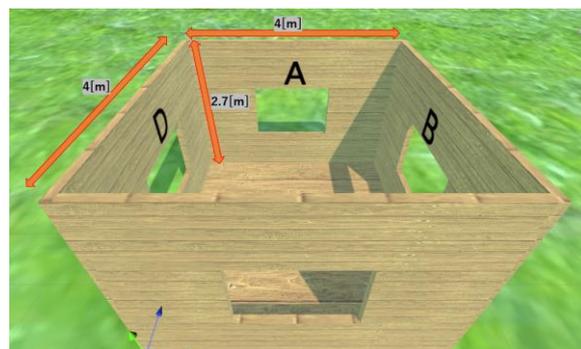


図8：方向感提示コンテンツのVR空間

実験結果の詳細はポスター発表にて行うが[4]、人体モデルがない場合は確信をもって回答している被験者は3割ほどであり、正答率も約20%であった。これに対して人体モデルがある場合では、6割以上の被験者が確信をもって回答しており、正答率も7割を超えた。以上の結果から、人体モデルを考慮した実時間流体計算による匂い提示によって、方向感を提示することが出来たと考えられる。

5. まとめ及び今後の展望

本研究ではCFD 計算プログラムをVR プログラムと統合することで、流体計算内と仮想空間内の物体情報の遅延を軽減した。加えて、実時間数値流体計算による匂い提示を行うことで、匂いの方向感の提示を実現した。本学会の技術展示では上記の方向感提示のデモを行う予定である。

今後は仮想空間内を自由に移動したり、匂い源を動かしたりするといった、自由度の高い状況における嗅覚再現を行う。

謝辞

本研究で使用している実時間数値流体計算プログラムの基となるプログラムをご提供いただいた東京工業大学工学院機械系の青木尊之教授に感謝する。本研究の一部はJST 未来社会創造事業(No. 22692685)の支援を受けた。

参考文献

- [1] T.Nakamoto, T.Hirasawa, Y.Hanyu, “Virtual environment with smell using wearable olfactory display and computational fluid dynamics simulation” IEEE Virtual Reality, 2021.
- [2] T.Nakamoto, H.Pham, D.Minh, “Improvement of olfactory display using solenoid valves” IEEE Virtual Reality, 2007.
- [3] 青木, Liu, 中本, “実時間数値流体シミュレーションを用いた嗅覚VRの研究”, VR学会 香り・味と生体情報研究会, 2022.
- [4] 中本, 宇田, “実時間数値流体計算を用いた嗅覚VRにおける人体の影響” VRSJ, 2023(発表予定).