



# 嗅覚 VR における実時間数値流体計算の有用性

## Usefulness of Real-time CFD in Olfactory VR

宇田匡郁史<sup>1)</sup>, 中本高道<sup>2)</sup>

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.ee.titech.ac.jp)

**概要:** 近年、仮想空間における嗅覚の重要性は高まっている。現実に近い嗅覚体験を実現することで、火災などの匂い情報の価値が高い状況における訓練への応用が期待される。我々は実時間流体計算を用いて、嗅覚体験の質の向上を研究してきた。本研究では、仮想空間の匂い探知における実時間数値流体計算の有用性を検討した。実験の結果、仮想空間内の匂い源探知の際、実時間数値流体計算により匂い方向感が増すことが分かった。

**キーワード:** 嗅覚、数値流体計算

### 1. はじめに

仮想技術に関する様々な研究が行われる中で、嗅覚に関する研究は少ないが、様々な形式の嗅覚ディスプレイが研究されている[1][2][3]。仮想空間に嗅覚を実現するためには、ユーザーへ匂いを提示する嗅覚ディスプレイだけでなく、仮想空間における匂い分布を求める必要がある。従来の研究では、等方拡散モデルを用いた嗅覚提示が行われている[4]。この方法では匂い源とユーザーの距離に応じた強度の匂いを提示しており、風の影響を考慮することは難しい。より現実に近い匂い分布を求めるために、流体計算によって得られた匂い分布に従って、匂いを提示する研究も行われている[3][5]。通常の流体計算は計算コストが高いため、事前に仮想空間内の匂い分布の時間変化を計算し、そのデータに基づいてユーザーへ匂いを提示している。事前に計算を行う方法では、仮想空間内をユーザーがどのように動くかが予測できないため、ユーザーの動きによる匂い分布の変化を計算することができない。したがって、私たちの研究では空間解像度を抑えた上で、弱圧縮性流体計算を用いることで実時間内に流体計算を実行し、匂い分布をリアルタイムに計算する研究を行ってきた。先行研究では、人体が匂い分布に与える影響が認められており、匂いの方向感を実現した[6][7]。本研究では仮想空間内をユーザーが自由に動ける状況下で、実時間数値流体計算が匂い源の特定にどのような影響を与えるかを調査した。

### 2. システム概要

本章では実時間数値流体計算を用いた嗅覚 VR 環境の構成をまとめる。VR コンテンツは Unity によって作成されており、real-time CFD 計算プログラムは DLL(Dynamic Linked Library)として実装した。仮想空間上のユーザーの位置座標は 3[ms]毎に更新しており、流体計算は仮想空間内の時刻に追いつくまで随時実行される。流体計算は弱圧縮性流体計算による完全陽解法によって行われている。

#### 2.1 使用デバイス

本実験で使用したデバイス機材を図 1 に示す。Unity は 2020.3.20.f1 を用いており、HMD(Head Mounted Display)は Meta Quest3 を使用した。ユーザーは現実空間を歩くこともできるが、基本的に Meta Quest3 付属のコントローラーを使って仮想空間上を移動した。また、流体計算および VR コンテンツの動作には Intel Core i7-13700KF と NVIDIA GeForce RTX4090/24GB を搭載した PC を使用した。



図 1: 実験器具

## 2.2 実時間数値流体計算

実時間数値流体計算プログラムは先行研究[8]で使用したものと同様のものを使用している。本研究ではユーザーが仮想空間内を移動するため動的に境界条件を変更する必要がある。

### 2.2.1 境界条件

本研究の流体計算では動的に境界条件を変更しやすいという利点から、格子法を採用している。したがって、各格子が事前に用意された物体ラベルを持つ。物体が移動した場合はその座標に基づいて格子のラベルを変更する。また、物体が移動することで新たに生じた流体部分については、流体部分の初期値を代入する。

### 2.2.2 弱圧縮性流体計算

弱圧縮流体計算は非圧縮性流体計算においてポアソン方程式を解いて完全な非圧縮性を満足することを止め、十分に非圧縮性流体として見なせる範囲の僅かな圧縮性を許容する計算手法である。弱圧縮性流体計算は非圧縮性流体計算と異なり、陽解法で解くことが可能である。

## 2.3 嗅覚ディスプレイ

本研究では図 1 に示すような高速電磁弁開閉型嗅覚ディスプレイ[2]を使用した。この嗅覚ディスプレイは 12 種の香料を空気の混ぜることで任意の匂い濃度を出力することができる。匂いはチューブを通じて、ポンプによってユーザーの鼻元へと届けられる。

## 3. 官能検査

仮想空間内で匂い源を特定する VR コンテンツを用いて官能検査を行った。実験は 18 名の被験者に対して行われた。また、実時間数値流体計算の有用性を検証するため、人体モデルが存在する場合と存在しない場合の 2 通りの計算方法で実験を行った。

### 3.1 実験設定

実験に使用した仮想空間を図 2 に示す。仮想空間は  $3.0 \times 2.7 \times 4.0$ [m]の部屋で構成されており、ユーザーは部屋の中心に立った状態から開始する。また、部屋の両壁に赤と青の色のついた箱が設置されており、片方の箱から匂いが発生する。匂いは匂い源から室内に向かって  $0.02$ [m/s]流れるように設定した。部屋の室温は  $20$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]に設定されている。

ユーザーの体は  $0.2 \times 0.3 \times 1.7$ [m]の直方体として表現されており、温度は体表面温度を想定して  $32$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]で設定されている。人体モデルの前方、高さ  $1.5$ [m]の  $0.15$ [m]四方の空間の匂い濃度の平均を、コンテンツ中にユーザーが体験する匂い濃度としている。

本実験において、ユーザーは自由に方向転換ができ、コントローラーや自身の体の動きによって仮想空間上の部屋を移動することができる。実験には草の香り(cis-3-Hexen-1-ol)を使用した。

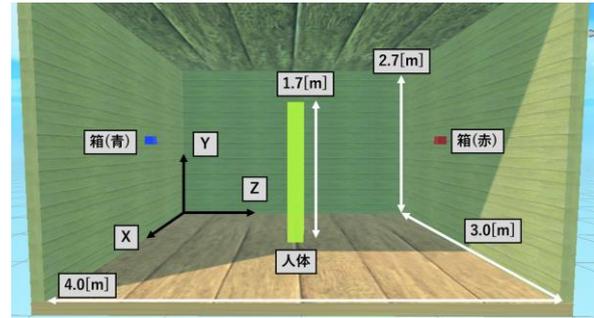


図 2: 仮想空間

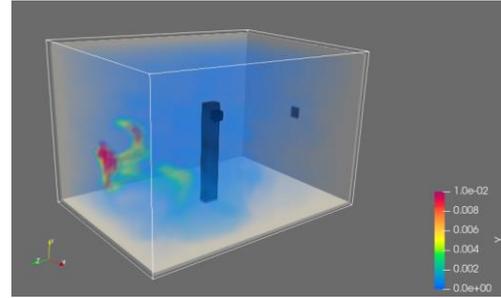


図 3: 人体がある場合の 20 分後の匂い分布

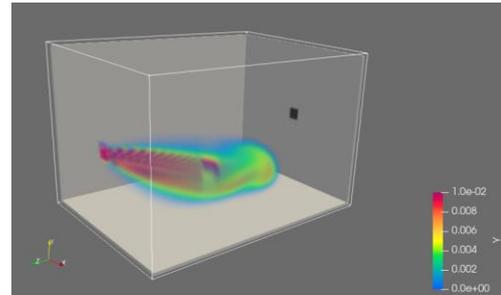


図 4: 人体がない場合の 20 分後の匂い分布

### 3.2 事前計算

匂いは  $0.02$ [m/s]で流れるため、匂いが広がるまで時間がかかる。したがって、事前に  $20$ [min]のシミュレーションを行い、そのデータを読み込んで計算を開始する。図 3 に人体モデルが存在する場合と存在しない場合の匂い分布を示す。人体モデルが存在する場合では、体温によって発生する上昇気流によって匂いが拡散している。一方で人体モデルが存在しない場合では、一定の流れで部屋の反対側に到達している。

### 3.3 実験結果

官能検査における被験者の回答を表 1 に示す。本実験の匂い源は赤色の箱に設定した。人体が存在する場合と存在しない場合の両方で高い正答率となった。

表 1: 官能検査の解答

回答	赤	青	正答率[%]
人体あり	15	3	83.3
人体なし	17	1	94.4

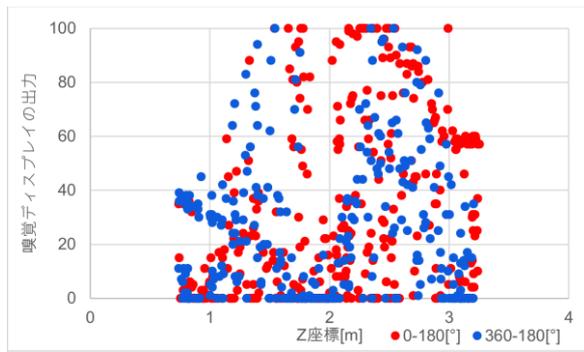


図 5: 人体が存在する場合の Z 座標と鼻付近の匂い濃度平均

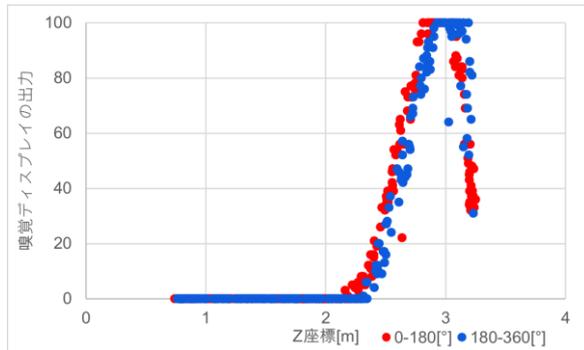


図 6: 人体が存在しない場合の Z 座標と鼻付近の匂い濃度平均

次に 2 つの場合の匂い体験の違いを分析するため、それぞれの場合において、仮想空間内の 2 つの箱を繰り返し往復した時の、Z 座標と嗅覚ディスプレイの出力値(鼻の部分の匂い濃度)の関係を調べた。以下に、人体モデルが存在する場合(図 5)と存在しない場合(図 6)の Z 座標と嗅覚ディスプレイの出力値の関係を示す。人体モデルが向いている方向の箱の色の点で描画されている。なお、匂い源である赤色の箱は Z 座標 4.0[m]に設置されている。

人体モデルが存在する場合では、部屋の中心での匂いが強く、両端での匂い濃度の差は小さい。一方で人体モデルが存在しない場合は、部屋の匂い源がある側では匂いが強く提示されているのに対して、匂い源の反対側では全く匂いが提示されていない。

人体モデルが存在する場合では、部屋の中心付近において赤色の方向を向いている時に、匂いの出力が強くなっている。また、匂い源の付近に近づいたときに反対を向くと匂いの出力が弱くなっている。一方で、人体モデルが存在しない場合では、向いている方向による匂いの強さの差は小さい。

#### 4. 考察

人体モデルが存在する場合において、仮想空間の位置による匂い濃度の差が小さいにもかかわらず、匂い源の正答率が高かった。このことから、被験者は匂い源を特定する際、匂いを感じた位置情報だけでなく、匂いの方向の情報も使っていることがわかる。

また、人体モデルの有無で、仮想空間内の匂い分布やユーザーへ提示される匂い強度が大きく異なっている。このことから、仮想空間における嗅覚体験にはユーザーの体の影響を考慮する必要があるといえる。そのためには実時間の流体計算が必要になる。

#### 5. まとめと今後の展望

本研究では嗅覚ディスプレイを用いて、移動可能な仮想空間上で、匂い源を特定する官能検査を行った。その結果、ユーザーの体の影響を考慮した流体計算がユーザーの匂い体験に大きな影響を及ぼすことが分かった。また、人が匂い源を特定する際、匂いを感じた時の位置だけでなく、向いている方向から判断していることが分かった。

現状では流体計算の計算コストが高いため、限られた空間でしか、実時間内に計算を実行することが出来ない。しかし、実時間数値流体計算によって実現する仮想空間内の匂いの方向感は、より広い空間での匂い体験において重要である。したがって、今後の研究では実時間数値流体計算を、計算領域を限定するなどの方法で、ユーザーの匂い体験を損なわずに、より広い空間に実時間数値流体計算を応用することを目指す。

**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] Y.Yanagida, T.Tanakamaru, H.Nagayanagi, Y.Nomura, T.Aritake, "Flat-shaped, Front-face-drive Scent Projector", IEEE Virtual Reality 2012.
- [2] T.Nakamoto, H.Pham, D.Minh, "Improvement of olfactory display using solenoid valves" IEEE Virtual Reality, 2007, 171-178.
- [3] T.Nakamoto, T.Hirasawa, Y.Hanyu, "Virtual environment with smell using wearable olfactory display" Proc, IEEE Virtual Reality, 2020, 22-26.
- [4] T.Yamada, S.Yokoyama, T.Tanikawa, K.Hirota, M.Hirose, "Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment", Proc. IEEE Virtual Reality, 2006, 207-212.
- [5] Matsukura, Haruka, Akira Ohno, and Hiroshi Ishida. "Fluid dynamic considerations for realistic odor presentation using olfactory display." Presence: Teleoperators and Virtual Environments 19, no. 6 (2010): 513-526.
- [6] 宇田, 中本, "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", VRSJ, 2023
- [7] 宇田, 中本, "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
- [8] M.Uda, T.Nakamoto, "Influence of User's Body in

Olfactory Virtual Environment Generated by Real-Time  
CFD," 2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User

Interfaces (VR), Orlando, FL, USA, 2024, pp. 951-959