



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

Influence of human body on olfactory VR using real-time numerical fluid dynamics simulation

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: 計算ステップ数を抑え、格子サイズを調整することで、一般 GPU 上での並列計算で実時間内に流体計算を行う。また、仮想空間内の物体変化に基づき、境界条件を更新することで仮想空間内の匂い濃度の変化を人の知覚に十分な精度で計算する。従来の流体計算ソフトでは任意に物体が動くケースの計算は困難で、嗅覚 VR でプレイヤー自身を含む人体の影響を考慮できなかった。本研究では実時間の計算によって動く人体が匂いの知覚に与える影響を検討する。

キーワード: 流体計算 嗅覚 インタラクティブ性

1. 研究背景

近年では仮想現実(Virtual Reality)の研究が盛んに行われている。その中でも HMD(Head Mounted Display)の動きに合わせて映像を切り替えることによる視覚の再現や、立体音響による聴覚の再現など、感覚の再現による没入感は徐々に向上している。しかし、嗅覚は他の感覚と比較して再現が遅れている。

嗅覚は人が日常生活の中で感じるものであり、危険察知や食欲の刺激、記憶への刺激など様々な効果があるとされる。したがって、仮想空間上での嗅覚の再現は没入感を高めるだけでなく、仮想技術の活用を大きく広げることも期待できる。

嗅覚の再現には大きく分けて二つの要素が必要になる。一つはユーザーへ匂いを提示する機構である。これは嗅覚ディスプレイと呼ばれ、事前に用意した匂いをユーザーに提示するもので、様々な形式が研究されている。[1][2]

もう一点は提示する匂い濃度の計算である。従来の研究では匂い源とユーザーの距離のみによって提示する匂い濃度を決定する等方拡散モデルが採用されていた。[3] しかし、このモデルは無風の状態を仮定しており、現実的ではない。匂いは分子拡散によって広がるが、その速度はおおよそ 50[cm/h]と微小である。これに対し、人が顔で感じることのできる風は 20[cm/s]とされている。人が感じない微風であっても分子拡散に比べて速く、実際の環境での匂いの広がりには風の影響が大きい。したがって、流体計算に

よって風の影響を考慮した匂い分布を取得する研究が行われてきた。[4]

流体計算では温度や圧力などの影響も考慮するため、計算に膨大な時間を要する。そのため、従来の研究では事前にスーパーコンピュータ等を使って流体計算を行い、その結果に沿ってユーザーへ提示する匂い濃度を算出していた。[5] しかし、この方法では仮想空間内のユーザーの動きによって発生する匂いの変化を反映することができない。例えば、ユーザーが仮想空間内の果物を動かした場合は当然匂いの分布が大きく変化することが考えられるが、果物の軌道を事前に決定することはできない。これでは仮想空間におけるユーザーと匂いのインタラクティブ性が失われてしまう。

この問題を解決するため、本研究ではリアルタイムで流体計算を行う。仮想空間内における物体の座標によって、流体計算の境界条件を変更し続けることで、ユーザーによって発生する匂い分布の変化を計算する。前報[6]を発展させて体験者自身が匂いの知覚に与える影響を調べた。

2. 実時間数値流体計算(RCFD : Realtime CFD)

まず、本研究で用いている流体計算について整理する。

2.1 RCFD の概要

本シミュレータは弱圧縮性流体モデルで、流速、圧力、温度、濃度を計算する。弱圧縮性モデルでは、流体の速度を音速で割った値であるマッハ数が十分小さい場合に、流

体の微小な密度変化を考慮することができる。一般的に、マッハ数は 0.3 以下であることを想定しており、計算における濃度は空気中に存在する匂い物質の質量分率をしている。

2.2 基礎方程式

本シミュレータでは(2.1) 式に示す弱圧縮性流体における Navier-Stokes(NS) 方程式を使用している。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2.1)$$

ただし、流速を \mathbf{u} 、圧力を p 、動粘性係数を ν 、単位体積当たりの外力を \mathbf{f} としている。また、NS 方程式において考慮すべき外力とは浮力のことである。浮力は密度の変化によって表すことができ、密度変化は温度変化と比例関係にあると仮定するブジネスク近似によって(2.2) 式を得る。

$$\mathbf{f} = \beta(T - T_0)\mathbf{g} \quad (2.2)$$

ただし、流体の体膨張率を β 、流体の温度を T 、基準温度を T_0 、重力加速度を \mathbf{g} としている。本シミュレータでは理想気体に成立する $\beta = 1/T_0$ に設定している。

NS 方程式を解くために必要になる圧力は(2.3) 式に示す圧力発展方程式によって求める

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -c_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} + \nu \nabla^2 p \quad (2.3)$$

ただし、音速を c_s としており、弱圧縮性流体計算の場合は音速を現実の 1/10 程にすることで、(2.8) 式に示すタイムステップを大きくし、計算効率を上げている。

ここで、(2.3) 式の第 2 項はほかの値に比べて小さい値をとるため、本シミュレータにおける圧力発展方程式は近似した以下の(2.4) 式を使用している。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -c_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (2.4)$$

NS 方程式が流体の運動量保存則であったのに対し、非圧縮性流体のエネルギー保存則から以下の(2.5) 式の温度の輸送方程式を得る。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}T) = \alpha \nabla^2 T \quad (2.5)$$

ただし、温度を T 、熱拡散係数を α としており、熱拡散係数は以下の(2.6) 式で求められる。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.6)$$

ただし、比熱を c_p 、熱伝導率を λ 、密度を ρ としている。また、本シミュレータでは比熱を $1005[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$ 、熱伝導率を $0.02537[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ 、密度を $1.225[\text{kg}/\text{m}^3]$ で設定している。

匂い濃度を求めるための濃度の輸送方程式を以下の(2.7) に示す。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}Y) = D \nabla^2 Y \quad (2.7)$$

ただし、濃度(匂い物質の質量分率)を Y 、物質拡散における拡散係数を D としている。また、本シミュレータでは拡散係数を 20°C 、 1atm における空気中のエタノールの拡散係数である $1.18 \times 10^{-5}[\text{m}^2/\text{s}]$ で設定している。

また、本シミュレータでの計算ステップ Δt は、格子サイズ Δx と音速 c_s を用いて以下の(2.8) 式で設定している。

$$\Delta t = \frac{1}{2} \frac{\Delta x}{c_s} \quad (2.8)$$

3. 官能検査実験

3.1 実験方針

2章で述べた流体計算のプログラムを VR コンテンツと連携させ、匂い源探索の官能検査を行った。[7] 実時間数値流体計算によって可能になるユーザーの体による匂いへの影響を明らかにする。

3.2 官能検査 I

3.2.1 実験設定

仮想空間内に $5.8[\text{m}] \times 2.7[\text{m}] \times 3.15[\text{m}]$ の部屋を設定する。そして、ユーザーから各方向へ $1[\text{m}]$ 離れた位置に植物のオブジェクトを配置する。(図 1) 4 つの植物のうち 1 つのみが匂いを発しており、ユーザーはその場で任意の方向を向き、匂いを発している植物を特定する。この実験ではユーザーは歩いたり、屈んだりすることはできず、その場で体の向きを変えることしかできない。このコンテンツにおけるユーザーの体は $0.4[\text{m}] \times 1.7[\text{m}] \times 0.15[\text{m}]$ の直方体として表現している。温度は、室内を 20°C 、人体を 32°C で設定した。この温度差によって、人体の周辺に上昇気流が発生し、足元の匂いがユーザーの鼻へ届く。

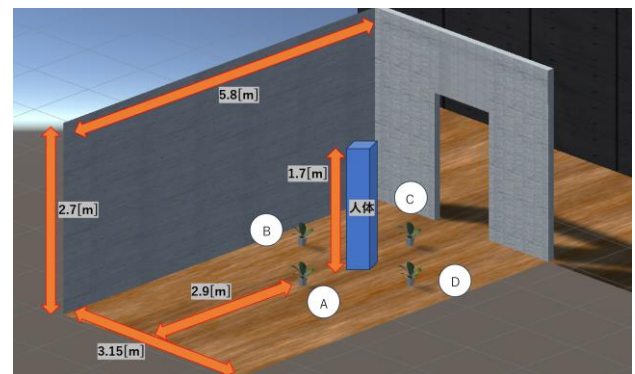


図 1：足元の匂い源の特定コンテンツの設定

この実験は 68 名の被験者に対して行い、図 1 に示すアルファベットで、どの植物が匂いを発していると感じたかを答えてもらった。また、匂いの提示には図 2 に示す高速電磁弁開閉型嗅覚ディスプレイ [8] を使用した。



図 2：使用した嗅覚ディスプレイと HMD

3.2.2 実験結果

この実験における結果を以下の表 1 に示す。

表 1：官能検査 I における被験者の回答と正答率

匂い源	参加者回答 (A)	参加者回答 (B)	参加者回答 (C)	参加者回答 (D)	正答率
A	20(37.74%)	7(13.21%)	9(16.98%)	17(32.08%)	37.74%
B	0	1(25%)	2(50%)	1(25%)	25%
D	1(9.1%)	0	1(9.1%)	9(81.82%)	81.82%

匂い源を C のオブジェクトに設定した場合、扉へ向かって匂いが流れてしまい、ユーザーへの匂い提示が著しく弱くなってしまったため、匂い源は ABD の三か所のいずれかで設定した。結果を見ると、匂い源が A の時の B と D の回答数に差があることと、匂い源が B である時と D である時とで、大きく正答率に差が出ている。このことから本シミュレータにおける匂い分布が D 側に偏っていると考えられる。今回の設定では風は吹いておらず、匂い分布は、体温によって発生する微弱な上昇気流に大きく影響を受けている。このような状況ではわずかな要因で匂いの分布は大きく影響を受ける。また、全体でみると 68 人中、匂い源を正しく特定できたのは 30 人であり、正答率は 44.1%であった。

想定していたよりも正答率は低かった。しかし、仮想空間上ではなく実際に匂い源を用意した場合に同様の実験を行ったとしても、足元の匂い源を特定することは困難であると考えられる。加えて、ほとんど無風の条件でのシミュレーションで、流体計算の偏りの影響を受けたことも原因の一つであると考えられる。したがって、次の実験では風のある状況で、匂い源を特定する実験を行った。

3.3 官能検査 II

3.3.1 実験設定

仮想空間内に $4[m] \times 2.7[m] \times 4[m]$ の部屋を設定する。壁には、それぞれ幅 $1.5[m]$ 、高さ $1[m]$ の窓が設置されており、どの窓も解放されている。(図 3) 4 つのうち 1 つの窓から草の匂いが $0.2[m/s]$ の風に乗って吹き込んできている。前の官能検査と同様、ユーザーはその場で任意の方向を向いて匂いを確かめることが出来る。また、吹き込んでくる風の温度は $10[^\circ\text{C}]$ で設定している。

この実験では、人体モデルの有無による匂いの感じ方の違いを確かめるため、「(I) 人体モデルを設定しない場合」と「(II) 人体モデルを設定する場合」の両方で実験を行った。人体モデルを設定しない場合は、体温による影響がないため匂いは床付近に堆積していく。それに対して人体モデルを設定する場合は体温による上昇気流や、吹き込んだ風が体に当たることによって、匂いがユーザーの鼻の位置まで到達する。したがって、以上の 2 つの場合におけるユーザーの鼻周りの匂い濃度には大きく差がでるが、どちらの場合にもユーザーへ匂いが提示されるように嗅覚ディスプレイへ送信する出力値の調整を行っている。

この実験は 18 名の被験者に対して行い、前の官能検査と同様の嗅覚ディスプレイを使用した。(図 4)

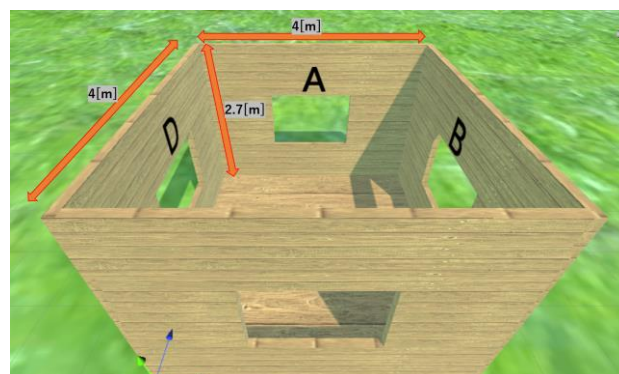


図 3：四方向の窓からの匂い提示コンテンツの設定



図 4：コンテンツの体験の様子

3.3.2 実験結果

本実験では匂いが来ていると感じた方向だけでなく、回答の確信の有無についても質問した。また、本実験での匂い源の位置はすべて B の窓に設定している。この実験における結果を以下の表 2 に示す。

表 2：官能検査Ⅱにおける被験者の回答

人体モデル	A	B	C	D	確信あり	確信なし
なし	5(27.8%)	4(22.2%)	4(22.2%)	5(27.8%)	6(33.3%)	12(66.7%)
あり	3(16.7%)	13(72.2%)	2(11.1%)	0(0%)	12(66.7%)	6(33.3%)

人体モデルがない場合は方向による匂いの変化がほとんどなく、回答にも偏りが見られなかった。加えて、回答に対する確信についても、6割以上の被験者は確信がないと答えている。実際、被験者の一部はどの方向でも匂いがすると答えていた。それに対して、人体モデルがある場合は方向によって匂いの変化が大きく見られ、7割以上の被験者が正解の B の方向を回答した。更に、回答に対する確信についても、6割以上の被験者は確信があると答えている。

4. 考察

官能検査Ⅰに見られた流体計算の偏りが官能検査Ⅱに見られなかったことから、風が吹いているような、匂いに大きく影響を与える要因がある場合は、実時間数値流体計算によって、ある程度の精度で匂いを提示することが出来ると考えられる。また、実際の環境では無風の状態はほとんど考えられないため、実時間数値流体計算による匂い提示は実用性のあるものであると考えている。

官能検査Ⅱにおいて、人体モデルの有無によって被験者の回答に大きな差が見られていることから、嗅覚提示において人体の影響は大きいといえる。また、人体モデルを考慮することで、匂いによる方向感の提示が可能であると考えられる。また、被験者の約 30% は A や C と回答している。この原因の一つとして、嗅覚ディスプレイにおける匂い提示の遅延が考えられる。本実験で使用した嗅覚ディスプレイはポンプによって匂いを提示している。本実験の仕様上、ユーザーが回転するため嗅覚ディスプレイと HMD を繋ぐチューブを 2.5[m] で使用した。チューブの内径は 3[mm] であり、ポンプの出力は 1.7[L/min] であるから、嗅覚ディスプレイから出力された匂いがユーザーへ届くまで 0.6 秒ほどの遅延が発生する。ただし、実際はチューブの内壁での滞留や摩擦などによって更に大きな遅延が発生していると考えられる。1 秒ほどの遅延があると、現実の感覚で回転してしまうと隣の窓の匂いを誤認して

しまう可能性が考えられる。

5. まとめ及び今後の展望

本研究では実時間数値流体計算によって求めた匂い強度を提示することで、より現実に近い嗅覚の再現を行った。官能検査では人体モデルを考慮した計算を行うことで、匂いの方向感を提示することができることを明らかにした。

今後はより精度の高い人体モデルの使用による影響の調査を考えている。加えて、匂い源が移動するなどの幅広い状況での計算を考えている。

また、現在は流体計算を実時間に収めるために解析領域のサイズが大きく制限されている。人間の嗅覚で感じられる変化を計算するのに必要な解像度を探索することで、計算コストを下げ、より広い空間での嗅覚 VR 体験の実現を目指す。

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] 中本編著：嗅覚ディスプレイ フレグランスジャーナル社, 2008.
- [2] T.Nakamoto, “Essential of machine Olfaction & Taste”, Wiley, 2016, P247-314.
- [3] T.Yamada, S.Yokoyama, T.Tanikawa, K.Hirota, M.Hirose, “Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment” IEEE Virtual Reality, 2006.
- [4] H.Matsukura, H.Ishida, “Incorporating Fluid Dynamics Considerations into Olfactory Displays” Human Olfactory Displays and Interfaces Odor Sensing and Presentation, P415-428.
- [5] T.Nakamoto, T.Hirasawa, Y.Hanyu, “Virtual environment with smell using wearable olfactory display” Proc, IEEE Virtual Reality, 2020, 22-26
- [6] 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.
- [7] 中本, 宇田, “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(発表予定).
- [8] T.Nakamoto, H.Pham, D.Minh, “Improvement of olfactory display using solenoid valves” IEEE Virtual Reality, 2007.