



流体と剛体の連成シミュレーションを利用した 視覚情報提示による浮力の疑似触知覚の生起

Generation of Pseudo-haptics Perception of Buoyancy
by Photo-real Visualization using Fluid-rigid Body Coupled Simulation

深谷陸¹⁾, 福地健太郎¹⁾

Riku FUKAYA, Kentaro FUKUCHI

1) 明治大学大学院 先端数理科学研究科 (〒164-8525 東京都中野区中野 4-21-1, riku.fukaya@app.fukuchilab.org)

概要 : 本研究では 3DCG を用いた仮想空間内にて, 液体に浮かぶ固体に触れた際に感じる浮力を Pseudo-haptics (疑似力覚) によって提示する手法の開発を進めている. Pseudo-haptics の生起では提示する視覚情報の現実感が重要であるため, 本研究では流体と剛体との連成シミュレーションを用い, ユーザの固体への接触に対する固体および液体の挙動を精密にシミュレーションすることを試みた. またその際に, 固体にかかる浮力に応じて仮想空間内に表示されたユーザの手の位置を変位させることで pseudo-haptics を生起させる. このときの浮力と変位量との関係を様々に試した結果を本稿では報告する.

キーワード : Pseudo-haptics, 物理シミュレーション, 流体シミュレーション, 浮力

1. はじめに

錯覚を利用して触力覚フィードバックを疑似的に知覚させる手法である Pseudo-haptics[1] の実装では, ユーザの身体および力の作用する物体すべての挙動を物理シミュレーションにより実時間で求める必要がある.

多くの研究では作用の対象は固体であり, その重さや弾性あるいは剛性, 表面の材質感などを提示できるかどうかが多く調査されている. その際, 被験者側からの作用は押し込む・持ち上げる・なでるといったものが対象となることが多い. こうしたものを対象とする場合, ゲームエンジンに標準で搭載されているような基本的な物理シミュレーションエンジンによって十分に精度の良い演算が実時間でできる.

しかし作用する対象が液体 (流体) の場合これは簡単ではない. 一般に流体シミュレーションは複雑であり, さらに Pseudo-haptics を実装するためには流体と剛体との連成シミュレーションにより, ユーザの手あるいは流体に浮かんでいる剛体にかかる力を求める必要があるため, 実時間演算に適したシミュレーション手法を慎重に選択する必要がある. 本研究ではこれに着目し, 最適なシミュレーション手法について検討を進めている.

本報告では, 液体に浮かぶ固体とユーザの手との接触における触力覚フィードバックを疑似的に与える Pseudo-haptics の実装手法, 特に固体にかかる浮力を疑似的に知覚させる手法を説明する. また, 被験者 5 名による予備実験

の結果, 全員が提案手法により浮力を感じたことをあわせて報告する.

2. 背景

Pseudo-haptics[1] は, 日本語では疑似触知覚と呼ばれ[2], 主に視覚情報のみで疑似的な触力覚フィードバックを与える手法である. その基本的な原理は, ユーザが視認しているオブジェクトの位置や形状などになんらかの形で調整を加えることで, 身体にかかる力を表現することにある.

典型的な方法としては, 例えばユーザがマウスを用いて画面上のマウスカーソルを動かしている環境で, カーソルが通過しようとしている箇所では仮想的な凹凸や摩擦などから受ける力を疑似的にフィードバックする場合, 本来のマウス操作を反映したカーソルの移動量を適宜増減してカーソルを移動させる方法がある[3]. すなわち, 本来であればマウスをこれだけ動かせばカーソルもこれだけ動くはず, とユーザが予期した移動量から違ってカーソルを動かすことで錯覚させることを狙ったものである.

同様の原理に従えば様々な応用が可能である. 例えば併ら二本の指で挟んだ物体の大きさを, 指先にかかった力に応じて疑似的に縮めることで, 対象物体の弾性を錯覚させられることを報告している[4].

Pseudo-haptics はクロスモーダル錯覚現象の 1 つとされており[5], 自身の行為に対する外界の変化を日常的な経験を基に脳が予測し, それと実際の視覚入力との差異から実

際には存在しない外部からの作用の存在を推測し、それを触力覚として錯知覚する現象であると考えられている。そのため、Pseudo-haptics の生起のためには日常的な経験に即した現実感のある視覚情報を提示することが望ましい。特に身体と対象物体との間の物理的作用を高精度に再現し、また錯覚させたい疑似触力覚を計算するために、物理シミュレーションの手法が広く採用されている。

3. 関連研究

佐野らは MR 空間内で視覚情報として液体の挙動を提示することで Pseudo-haptics の生起が液体を対象としても可能であることを示した[6]。同研究では、実物体を把持した上で手の振りに応じて物体内部に揺れる液体の CG 映像を重畳描画することで重さ知覚に対する影響を確認した。結果として液体の揺れの角加速度が遅くなるほど把持物体の重量を大きく感じ、速くなるほど小さく感じることを示した。ただし液体の動きは簡易的に表現されたものであり、しぶきや波などの物理現象は再現されていない。

液体を対象とした触覚提示手法の例としては、池野らが徳利で液体を注ぐときのトクトクという振動をアクチュエータを用いて再現する手法を提案している[7]。このとき、液体の粘性感の再現を目的とし、徳利から液体を注いだときの振動パターンが粘性に応じて異なることに着目してモデルを構築し、それに従って生成した振動により液体の疑似的な粘性感を変化させられることを示した。

4. 浮力の疑似触知覚の生起

4.1 概要

これまで報告されてきた Pseudo-haptics の研究はいずれも剛体を主たる対象としており、流体の挙動を精密に再現したものは見られない。流体を対象とした場合、剛体のみを対象とする物理シミュレーションと比較すると、計算量が多くなり、応答性と精度の両立は困難となるため、再現したい挙動に応じて適切なシミュレーション手法を選択することが必要となる。

本研究では、流体と剛体の連成シミュレーションを利用して Pseudo-haptics による液体の感覚の提示が可能かどうかを調査する。今回はその一例として、液体に浮かべた固体をバーチャルハンドによって動かす際の挙動を再現した上で、それを液体に押し沈めた際に固体を通じて伝わる浮力の再現を目標とする。

固体を媒介させた理由は、一般に人間の身体は比重が水に近く生じる浮力が小さいため Pseudo-haptics の生起の難しいことが予想されたこと、また液体が透明でありその詳細な挙動が視覚的に観測しにくい一方で、固体を浮かべておくとその挙動から間接的に液体の存在を感じやすいことなどがある。

4.2 システム概要

本実験では図 1 に示す機器構成で実験を行った。具体的

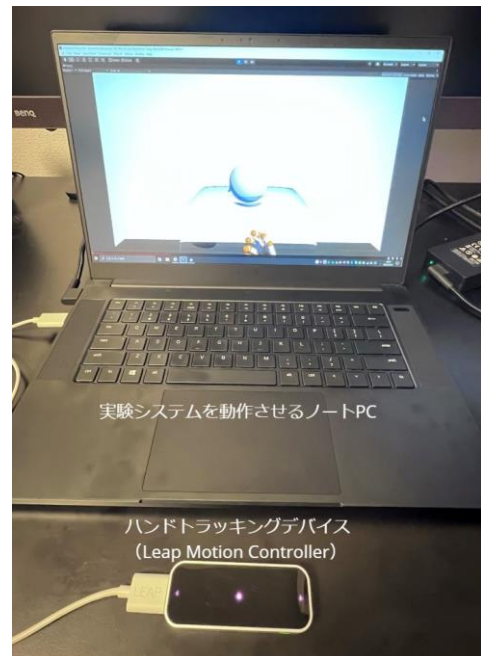


図 1: 実験システム概要

には、ユーザの手指の位置姿勢検出のために ultraleap 社の Leap Motion Controller を使用した。同機器はユーザの手や指の動きを近赤外線ステレオカメラで捉える光学式のハンドトラッキングモジュールである。認識範囲は機器表面から 60cm までの距離で、視野角は横に 140 度、縦 120 度である。提供されている SDK を用いることで骨や関節を含む 27 の手の要素を識別可能であり、手の一部がデバイスから隠れている場合でもトラッキングすることができる。

流体と剛体からなる仮想物体およびバーチャルハンドと相互作用の物理シミュレーション及び表示のために、CPU に Intel® Core™ i7-9750H、GPU に NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti を搭載したノート PC を使用した。ディスプレイ解像度は 1920×1080 ピクセルである。

4.3 流体シミュレーションの手法の選定

流体シミュレーションの手法は数多くの手法がこれまでに提案されており、それぞれに特性が異なるため、本実験で目的とする流体と剛体との相互作用を実時間かつ現実感を感じさせることができる程度に高精度な計算ができるものを選定する必要がある。

我々は代表的な手法である Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法、Finite Element Method (FEM)法、Moving Least Squares Material Point Method (MLS-MPM)法を比較した。

SPH 法は粒子法の一つで、質量保存則に自明に従うという利点がある。しかし、浮力の視覚情報提示に利用するにあたって必要な剛体との連成に必要な計算量が非常に大きく応答性を低下させること、また粘性を強く設定しなければ容易に発散してしまうなどの理由から、本実験には適さないと判断した。

FEM は格子法の一つで、主に剛体の構造解析に対して

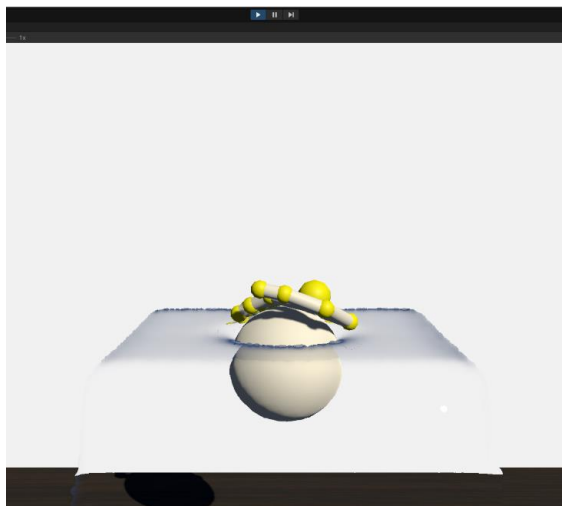


図 2: 仮想空間内でバーチャルハンドが液体に浮かぶ球体を押し下げた瞬間の様子

用いられるが流体にも応用することができ、要素の隣接関係が静的であるため計算量が少なく済む。しかし、移流が拡散しやすく、本実験で想定するような水槽に水を貯めておくといったシミュレーションでは流体の動きが不自然なものになりやすく、本実験には適さないと判断した。

MLS-MPM は粒子と格子の混成離散化手法の一種である[8]。この手法は移流のみ粒子法で計算し、それ以外の計算を格子法で行うことによって、質量保存則を自明に満たしつつ計算量を低減することができる。一方で強い結合状態の剛体は定式化されておらず、時間積分の累積誤差も問題となり、形状の変化しない固体を扱うには難がある。

この問題を、剛体との相互作用の演算の一部に機械学習技術を用いることで実用的な実時間演算を達成した製品として、Zibra Liquids がある[9]。同製品は Unity アセットとして利用可能で、流体の可視化にも優れることから、帆実験では同製品を利用することとした。これにより、図 2 に示すように液面の自然な挙動に加えて屈折まで含めたリアリティの高い可視化が実現できている。

4.4 Pseudo-haptics の生成

本実験での仮想空間のセッティングを図 2 に示す。画面下部には直方体の仮想の水槽が剛体として置かれ、その内部が流体で満たされている。水槽は不可視とした。

流体には剛体の球が浮かべられており、流体からの力を受けて動く。Leap Motion Controller によって認識されたユーザの手指はバーチャルハンドとして空間内に登場する。バーチャルハンドは上記の球体とのみ衝突が計算され、流体との相互作用は今回は計算しない。これは前述の理由によりバーチャルハンドが液体から受ける力が小さいことが予想されたためである。

今回の実験では疑似浮力のみを生起を確認することを目的としているため、球体の動きは鉛直軸上のみを制限している。これにより、流体と剛体との連成シミュレーションにおいて誤差の蓄積がもたらす軽微な発散によって球

体が不自然に激しく動くことを避けられる。なお、その後の研究でこの制限を解消したモデルでの研究を我々は進めているが本報告では省略する。

バーチャルハンドにより球体が流体中に押し下げられると、沈み込んだ体積に比例して球体には浮力がかかるため、球体を通じてその力をバーチャルハンドに伝える必要がある。ここで、Pseudo-haptics の基本的な考え方にのっとり、球体にかかる力に応じてバーチャルハンドの位置を実際の入力よりも変位させることとする。今回の実験では簡単のため、球体にかかる浮力を計算する代わりに、バーチャルハンドの液体表面からの距離に応じ、下記式に従って変位量を求めた。これは臼井らがばねの弾性力を Pseudo-haptics で提示した事例[10]を参考に定めた。

$$\text{変位量 } \Delta = \left(\frac{y}{2}\right)^{1.1} \dots y \text{ は押し下げた量}$$

5. 実験

5.1 実験概要

ここまで述べてきた Pseudo-haptics の実装について、被験者 5 名を対象に、簡易な印象評価を行う比較実験を実施した。実験環境は図 1 に示したものと同様であった。

実験ではバーチャルハンドの変位量の調整を行わない条件と、4.4 節で説明した球体の押し下げ量に応じた調整を行う条件の 2 条件を、被験者内で比較した。

実験参加者は 5 名で（男 3:女 2）であった。

5.2 実験手順

まず、実験参加者に実験システムの前に座ってもらい、実験システムを起動した。このとき、仮想水槽内の流体が初期位置からシミュレーションに従って移動するため液面が乱れるため、それが安定するまで 10 秒ほど待機させた。

次に、調整なし条件での操作を被験者に行わせた。このとき、シミュレーションの発散を避けるために球体はゆっくり押し下してもらうように注意をした。球体が全て沈んでから 5 秒ほどで押し下を止めてもらい、球体の位置が初期状態に戻るまでゆっくりと手を上げてもらった。

次に、液面が安定するまで再び待機した後、調整あり条件で再び球体をゆっくりと押し下してもらった。操作内容は調整なし条件と同じとした。

両条件での操作が完了した後に、3つの項目からなるアンケートに回答してもらった。実験の目的については実験開始時から特に被験者には説明せずに、感じたままを回答するよう指示した。実験時間は全行程合わせて約 5 分となった。

5.3 アンケート

実験終了後のアンケートでは、Pseudo-haptics による疑似浮力のみを生起を確認するために以下の三つの質問項目に対し、「はい」「いいえ」のどちらかで回答してもらった。その際、長く回答を検討することなく、第一印象で答えて

もらうよう被験者に伝えた。

1. 浮力を感じたか
2. 腕に疲れを感じたか
3. 2回目のほうが浮力を感じたか

また上記質問項目に加えて、自由回答で実験全体に対する感想を求めた。

5.4 結果

アンケートの結果、すべての質問項目において被験者は「はい」と回答した。すなわち、全員が浮力を感じ、また調整あり条件の方がより浮力を強く感じ、また腕に疲れを感じたという結果となった。

自由回答においては以下の意見があがった。

- ・ 2回目のほうが液体の粘性が強くなったように感じた
- ・ 手に変な力が入った
- ・ 液体が不透明だともっと強く浮力を感じると思う

6. 考察

今回は簡易的な実験であったため、上記の結果からただちに提案手法の有効性を主張することはできない。しかしながら流体の挙動を高精度に計算し可視化することで、バーチャルハンドに対する調整がなくとも被験者が浮力を感じたと回答したことは興味深い。おそらく、浮かんだ球体の挙動から間接的に浮力を感じていたものと考えられる。また、バーチャルハンドの変位量を調整することでさらなる Pseudo-haptics の提示ができる可能性が示唆された。

一方で、実験システムの設定では液面の挙動が観察しにくいことが、「液体が不透明だともっと強く浮力を感じると思う」という回答から推察される。現状の実装では仮想水槽の周囲が白色で覆われているため、屈折によって水槽より奥の風景が歪んだり、液面での光の反射によって周囲の風景が映り込むといった現象が生じず、液面の動きを視認することが難しい。

7. 今後の課題

今回の実験では、流体と剛体の連成シミュレーションにより液体の挙動を高精度に再現することで浮力の Pseudo-haptics を表現できる可能性が確認できた。その主要因としては液面に浮かぶ球体の現実的な挙動に負うところが大きいと考えられる。次の段階として、球体にかかる浮力からバーチャルハンドの変位量を調整する手法を確立した上で、それが Pseudo-haptics の生成にどの程度寄与するかを明らかにしたい。加えて、液面の挙動がよりよ

く視認できるよう仮想環境内に視覚的手がかりを増やすことを検討する必要がある。

最終的には、液体に浮かべた球体を經由せずに、直接バーチャルハンドにかかる浮力を疑似的に知覚させることができるかどうかを検証したい。

参考文献

- [1] A. Lecuyer: *Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback*. Presence Teleoperators & Virtual Environments, Vol. 18, No. 1, pp. 39-53, 2009.
- [2] 高椋慎也: 映像が生み出す疑似触知覚の計算論. システム/制御/情報, vol. 61, no. 11, pp. 447-452, 2017.
- [3] A. Lecuyer, J. M. Burkhardt and L. Etienne: *Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures*. CHI '04: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 239-246, 2004.
- [4] 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 手形状変形フィードバックを利用した把持動作における硬さ知覚操作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 523-532, 2014.
- [5] 荒井観, 岡嶋克典: クロスモーダル現象としての Pseudo-haptics, システム制御情報学会誌, Vol. 61, No. 11, pp. 440-446, 2017.
- [6] 佐野洋平. 橋口哲志. 柴田史久. 木村朝子. 動的に変化する複合現実型視覚刺激が重さ知覚に与える影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.2, pp.255-264, 2014.
- [7] 池野早紀子. 岡崎龍太. 蜂須拓. 佐藤未知. 福嶋政期. 梶本裕之. 徳利振動の変調による液体の粘性感操作. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, Vol.2013, ROMBUNNO. 1A1-E04, 2013
- [8] Yuanming Hu, Yu Fang, Ziheng Ge, Ziyin Qu, Yixin Zhu, Andre Pradhana, Chenfanfu Jiang: *A Moving Least Squares Material Point Method with Displacement Discontinuity and Two-Way Rigid Body Coupling*, ACM Transactions on Graphics, Vol. 37, Issue 4, No. 150, pp. 1-14, 2018.
- [9] Zibra Ai. Approaches to real-time fluid simulation in visual effects. <https://zibra.ai/blog/approaches-to-real-time-fluid-simulation-in-visual-effects/> (参照 2022-7-26).
- [10] 白井亮人. 中島武三志. 菅野由弘. 視覚及び聴覚刺激によるバネの疑似力覚呈示. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 4, pp. 271-279, 2018.