



# Liquid Hand Illusion

## 液体に対する身体所有感の生起に関する研究

Inducing the Sense of Body Ownership on a Liquid Avatar and  
Improving an operability for a Liquid Manipulation

小柳陽光<sup>1)</sup>, 鳴海拓志<sup>2)</sup>, 大村 廉<sup>1)</sup>  
Akimi Oyanagi, Takuji NARUMI, and Ren Ohmura

- 1) 豊橋技術科学大学大学院 工学系研究科 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)  
2) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,  
narumi@cyber.rcast.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 本研究では、非ヒト型アバタの一つとして液体アバタへの直感的な操作を得るために、液体へ身体所有感を生起することを目指す。本実験ではバーチャルハンドから液体アバタへと変化し、VR空間上の箱を指定の場所に運ぶ課題を実施した。液体に変化する前のバーチャルハンドが同期して動く条件、および、非同期に動く条件を設定し、条件間での身体所有感の強さ、および、課題成績を比較した。実験の結果、条件間で評価に差は見られなかったが、バーチャルハンドと同程度の身体所有感が生起していることが示された。

**キーワード:** 身体所有感, 行為主体感, 非ヒト型アバタ

### 1. はじめに

遠隔地に配置したロボットのセンサから得た感覚情報を操縦者に提示し、あたかもその空間に存在する感覚を得る技術体系をテレイグジスタンスと呼ぶ。近年、ドローンのような非ヒト型構造の機体を対象としたテレイグジスタンスの研究が増加してきている[1]。これら非ヒト型機体はヒトが活動できない空間に対して活動することができ、ヒトの能力を超えたテレイグジスタンスを実現できる。一方、ヒト型とは異なり、非ヒト型機体はヒトとは身体構造が合同ではないため、身体を対応付けて機体を直感的に操作することができない。したがって、非ヒト型機体とヒトとの構造的なギャップを克服する手法を提案する必要がある。

ギャップを克服する手法として身体所有感の生起を提案する。身体所有感とは、ある身体が自分の身体である、という感覚である。VR心理学では、自分の身体ではないバーチャルな身体に対しても実験的に身体所有感を生起することができる。そして、脳の運動の予測と表示の誤差から生じる余分な力によってもたらされる疑似触覚現象 Visual Pseudo Haptics が身体所有感を生起した場合にも生起することが報告されている[2]。このことから、操作対象となる機体への身体所有感は、機体操作を運動の予測

と目的動作の遂行のための運動モデルへと組み込ませ、より直感的な操作をもたらすことが期待できる。

特に、本研究では変幻自在な身体の獲得を目指し、そのための研究の第一歩として、柔軟に身体が変形する液体を非ヒト型機体として選択する。一方、液体に関する身体所有感の生起を試みた研究は、筆者が知る限りこれまでにない。そこで本研究では、非ヒト型身体への身体所有感の生起可能性、および、液体の身体表象の獲得可能性、それぞれの操作パフォーマンスへの影響を調査していく。

### 2. 関連研究

身体所有感是多感覚情報(視覚-体性感覚間, 視覚-自己受容感覚間)を同期提示した場合に、身体所有感が生起することが報告されている[3]。特に、ユーザの運動とアバタの動作を同期して表示する視覚-自己受容感覚の同期提示は、外見を問わず様々な身体的特徴を持ったアバタに対しても身体所有感を生起できる[3]。

非ヒト型アバタを対象とした研究では、2・3倍長い手のアバタ、および、単純な風船のアバタなどに対しても、被験者の運動に対して非ヒト型身体部を連動させて動かすことで身体所有感が生起することが報告されている[4, 5]。一方、今回対象とする液体は、ヒトの肉体と比較し

て常に不定形な形を取っており、凝縮・拡大という激しい形状の変化を持つ物体である。したがって、前提として液体アバタに対して身体所有感が生起する可能性について検討する必要がある。

また、今回の液体のような場合、身体所有感よりも、あたかも身体が液体へと変化したような感覚、すなわち自身の身体が現在どのような状態となって知覚されているのか、という身体表象が重要である可能性も考えられる。ヒトの身体表象は、現在自分がどのような姿勢をとっているのか、という現在の身体表象から体性感覚情報と視覚情報が統合することによって更新される。例えば、自身の鼻をつまんだ状態で上腕二頭筋の腱に振動刺激を加えると、あたかも鼻が伸びたように感じるピノキオ錯覚がある。これは、通常時の鼻の長さを持っている身体表象から、運動錯覚を起こすことで、鼻が伸びた位置に自身の手があり、結果として鼻も伸びたと解釈されて引き起こされる現象である[6]。

身体表象という点から操作性への影響を検討した研究は筆者が知る限りこれまではなかった。しかしながら、今回は液体という特殊な身体を取り扱うという点から、ユーザが自身の身体が液体へと変化した、という意識を前提として得られるのか、得られるのであれば非ヒト型アバタを操作するうえで重要であるのか、という点について今後非ヒト型身体を取り扱ううえで検討していく必要がある。

以上の点から、本研究では以下の点について研究を進めていく。

1. 液体アバタに対する身体所有感の生起可能性
2. 液体の身体表象の獲得可能性
3. 身体所有感と身体表象のそれぞれの液体アバタの操作への影響

### 3. バーチャルハンドと液体アバタの操作実験

すでに述べた通り、本研究では非ヒト型身体として液体を選択し、ヒトとの構造的なギャップを埋めてより直感的に操作感をもたらすことを目指す。その手法として液体への身体所有感の生起し、非ヒト型身体を運動モデルへと組み込みやすい状態とする方法を検討する。ここでは、液体アバタへの身体所有感の生起可能性、および、液体への身体表象の可能性、操作感への影響を調査する実験を行う。

#### 3.1 実験装置・実験プログラム

ここでは、バーチャルハンドと液体アバタを動かすうえで実験に使用した実験装置、および、実験プログラムの挙動を説明していく。

各アバタの座標のトラッキングには HTC VIVE Tracker を使用した。指の運動は、各指関節の一自由度を持つハンドトラッキングデバイスの Manus VR を使用した。視覚刺激には HTC VIVE Pro を使用して提示した。実験プログラムは、GPU NVIDIA GeForce 1080, CPU 16GB, Windows 64 Home Edition を搭載したパソコンで実行した。



図 1: バーチャルハンド(左)と液体アバタ(右)

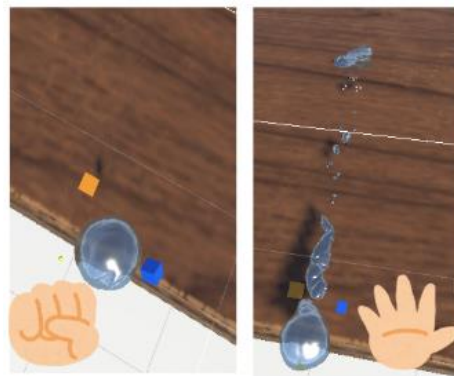


図 2: 液体アバタの縮小(左)と拡大(右)

バーチャルハンドは図 1(左)に示すような肉体的な 3D モデルを使用した。液体アバタには、流体シミュレータ NVIDIA FLEX for Unity から生成した図 1(右)に示すような液体モデルを使用した。Unity 用の流体シミュレーションアセット NVIDIA FLEX for Unity は、各粒子にベクトルを加えることで運動を制御することができる。本実験では、VIVE TRACKER の位置を液体アバタ全体の移動とし、図 2 に示すように指を開いたときを液体の拡大、指を閉じたときを液体の収縮に割り当てて操作した。また、拡大時には指の開閉具合に応じた振幅の振動刺激を MANUS VR から与えた。

#### 3.2 実験条件

既存研究ではバーチャルハンドの操作時に身体所有感が得られることがすでに報告されている。本実験では、バーチャルハンドを動かしている状態と液体アバタを動かしている状態との間の身体所有感を比較することで身体所有感の生起可能性を調査する。

また本実験では、身体所有感が生起している状態のバーチャルハンドから液体に変化する体性感覚情報・視覚情報を加えることで液体の身体表象が得られると仮定し、条件を設定する。バーチャルハンドを動かす段階においてバーチャルハンドが、被験者の腕部の動きに対して同期する VH 同期条件、および、事前に用意したアニメーションに従って動く VH 非同期条件の 2 条件を設定した。仮説通りであれば、VH 非同期条件と比較して、VH 同期条件において、身体が液体となった感覚が有意に高くなる。これにより、

液体の身体表象の獲得可能性を検討していく。そして、条件間の課題に対する成績を比較することで各要因の操作性への影響を調査する。

液体アバタの操作時にはいずれの条件においても被験者の操作と同期してアバタを表示した。条件の提示順は被験者ごとにカウンターバランスをとった。またこれらの条件は被験者内要因として設定した。

### 3.3 実験手順

実験では、VR 順応フェイズ、バーチャルハンド操作フェイズ、液体化フェイズ、液体操作フェイズの 4 つの段階を用意し、各段階に沿った課題を被験者に行わせた。

VR 順応フェイズでは、バーチャルハンドと被験者の手の向きのキャリブレーション、VR 空間への順応、および、液体アバタの操作方法の習得を目的とした。被験者は指示を受けながらバーチャルハンドと液体アバタを操作した。指示した動作は、バーチャルハンド時には指の開閉一回のみを行わせることであった。液体アバタ時には指の開閉を一回させ、指の開閉具合で液体が拡張し、手を向けた方向に向かって拡張することを理解させた。VR 順応フェイズは実験開始直後、一回行った。

バーチャルハンド操作フェイズでは、図 3(左)に示すように、バーチャルハンドを 2 分間操作して可能な限り多く VR 空間上の赤い箱を指定の黄色い区画に置くように被験者に指示した。

液体化フェイズでは、バーチャルハンドが液体アバタへと変化させる段階である。バーチャルハンド操作フェイズ終了後、被験者に所定の位置に手を置くように指示した。その後、バーチャルハンドに融解する液体化エフェクトを施し、消失させるとともに液体アバタを出現させた。液体化エフェクトとは、被験者の手につけたデバイスを振動させると同時にバーチャルハンドのメッシュが収縮し、最終的に消失するものである。そして最終的に操作対象の液体アバタを出現させる(図 4 参照)。

液体操作フェイズでは、図 3(右)に示すように、液体の拡張を駆使し、バーチャルハンド操作フェイズと同様に VR 空間上の赤い箱を指定の黄色い区画へと 2 分間で可能な限り多く置いていくように被験者に指示した。

課題終了後、液体アバタに対して炎のモデルを表示して液体を蒸発させるような演出を被験者に提示したのち、HMD を暗転させた。各条件の試行後、被験者にヘッドマウントディスプレイを外してアンケートに答えるように指示した。

### 3.4 評価内容

本研究では、液体アバタへの身体所有感の生起可能性、および、液体の身体表象の獲得可能性、身体所有感・身体表象のそれぞれが操作のタスクパフォーマンスに与える影響を調査する。したがって、身体所有感と身体表象、課題パフォーマンスを示す評価項目で全体を構成した。

#### 3.4.1 主観評価

主観評価として、表 1 に示すアンケートを使用した。



図 3: 箱の運搬課題

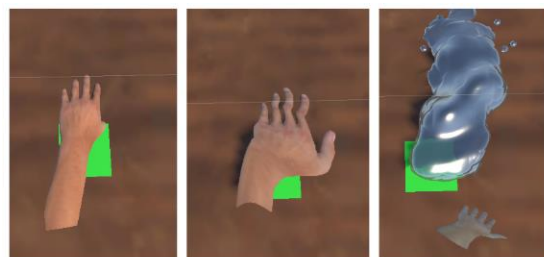


図 4: 液体化エフェクト

Q1	利き手側のアバタがあたかも自分の体の一部のように感じた
Q2	非利き手側のアバタ(液体時)があたかも自分の体の一部のように感じた
Q3	自分の非利き手があたかも溶けているように感じた
Q4	自分の非利き手が液体になったかのように感じた
Q5	非利き手のアバタ(液体時)を制御しやすいと感じた
Q6	アバタ(液体時)の操作に集中しなければならない度合いはどの程度強かったか
Q7	液体に火が移ったとき、あたかも自分の手が焼かれているように感じた
Q8	液体の使いやすさ

表 1: アンケート質問項目

アンケートは、既存研究[3]で用いられている身体所有感の強さについてを問う項目と、液体への身体表象についてを問う項目、操作感について問う項目で構成された。全ての質問において、1(全く感じない)から 7(とても強く感じた)の 7 段階のリッカートスケールで設問した。

#### 3.4.2 客観評価

身体所有感が生じたアバタに対して、ナイフで刺すなどの脅威刺激を提示したとき、自身に脅威が及んだと感じたとして生理反応に変化を示す。本実験でも身体所有感の客観的指標として、液体が火を受けて蒸発した際のガルバニック皮膚反応を用いた。

また、液体操作フェイズにおいて獲得した赤い箱の数をカウントし、課題成績として評価した。

## 4. 実験結果

社会人 7 名、および、大学生 3 人の計 10 人の被験者が同意の上、実験に参加した。実験では、アンケートの評価、および、ガルバニック皮膚反応、箱の獲得数のいずれも正規性が認められなかったため、ウィルコクソンの符号順位法の検定(有意水準 5%)を用いて、有意差検定を行った。また、バーチャルハンドと液体アバタとの間の身体所有感の同等性を比較するために、同等性の検定(上限下限 $\pm 0.5$ )を



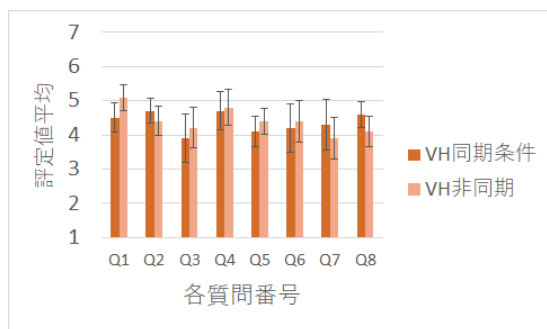


図 5: アンケート結果

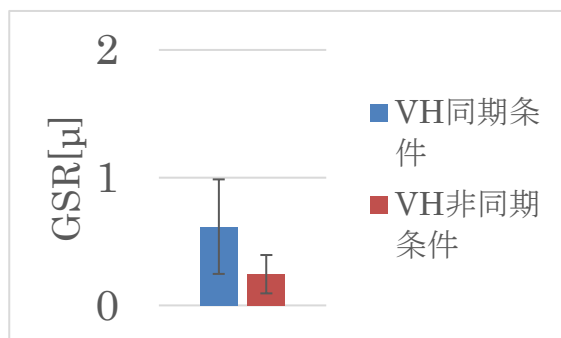


図 6: GSR 結果

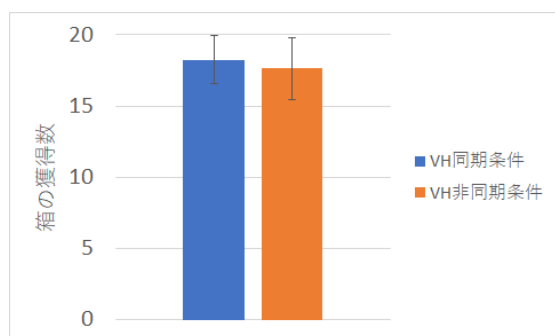


図 7: 箱の獲得数

行った。

アンケートの結果を図 5, ガルバニック反応の結果を図 6, 課題パフォーマンスの結果を図 7 に示す。なお, エラーバーはいずれも標準誤差を示す。実験の結果, いずれの評価においても有意差は見られなかった(有意差検定の統計量は紙面の都合上, 記載を省略する)。同等性検定においても, バーチャルハンドと液体アバタとの間に同等性は認められなかった(信頼区間:  $-1.1787775$   $0.7787775$ ,  $p=0.054$ )。

しかしながらコメントでは, “液体になった感じがある” という旨のコメントが多くみられた。このことから, 液体化エフェクトには意味はなく, 身体所有感と同様に視覚-運動の同期が重要である可能性が考えられる。

## 5. まとめ

本研究では, 非ヒト型アバタに対しても直感的な操作性を得るために身体所有感の生起による手法を検討した。特に非ヒト型アバタとして, 柔軟に形状が変形する液体を対象として身体所有感の生起可能性, および, 液体の身体表象の獲得可能性, それらが操作感に及ぼす影響について調

査した。実験では, バーチャルハンドと液体アバタを操作し, 赤い箱を所定の場所に運ぶ課題を行った。バーチャルハンドから液体アバタへの変化において, バーチャルハンドが, 変化前に被験者の手と同期して動作する VH 同期条件, 非同期に動作する VH 非同期条件の 2 条件を設定した。

しかしながら, いずれの評価項目においても有意な差は見られなかった。同等性検定においても, 液体アバタとバーチャルハンドとの間の同等性は見られなかった。このことから, 既存の身体表象から液体へと変化させることが, 操作感に影響を及ぼすとは言えなかった。またバーチャルハンドとも同等の身体所有感が得られなかったことから, 人間の手と同程度に液体アバタに身体所有感を生起できないことが示された。

ただし本実験では達成できなかった点がいくつかある。まず, 液体の操作が指の開閉という極めて単純な動作であったことから, 身体所有感の有無にかかわらず操作を習得してしまうという点がある。次に, 液体化を施すエフェクトが不十分であった点がある。エフェクトの外見的に手が液体になったというより, 液体が出現してきた, という体験となっている可能性が高く, 液体化エフェクトの評価も行うべきであった。また, 液体になったように感じたというコメントから, 単純にアバタと被験者との間の運動を同期提示のみで十分な可能性がある。今後の研究では, 上記の不十分であった点について議論し, 実験を進めていく。

## 参考文献

- [1] Hayakawa, H., Lasantha Fernando, C., Yamen Saraiji, M., Kouta, M., and Tachi, S., “Telexistence Drone: Design of a Flight Telexistence System for Immersive Aerial Sports Experience,” in *Augmented Human International Conference*, 2015, pp. 171–172.
- [2] Samed, M., Gatti, E., Hermes, A., Benko, H., Parise, Cesare., *CHI '19 Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Paper No. 320.
- [3] Lugrin, J. L., Latt, J., & Latoschik, M. E. (2015, March). Avatar anthropomorphism and illusion of body ownership in VR. *IEEE Virtual Reality (VR)*, 2015, pp. 229–230
- [4] Kilteni, K., Normand, J.-M., Sanchez-Vives, M. V., and Slater, M. (2012). Extending body space in immersive virtual reality: a very long arm illusion. *PLoS ONE* 7:e40867. doi: 10.1371/journal.pone.0040867
- [5] 櫻井翔, 鳴海拓志, 勝村富貴, 谷川智洋, 廣瀬通孝: *Interactonia Balloon: 風船を用いた能動的呼吸の誘発による緊張感の喚起・増幅*, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.18 No.3, pp.361-370, (2013).
- [6] Ramachandran, V. S., and Hirstein, W. (1998). The perception of phantom limbs. *Brain* 121, 1603–1630. doi: 10.1093/brain/121.9.1603