



人間は液体と固体の両方になり得るか？

Can HUMAN Be Both a Solid and a Liquid?

杉野森拓馬¹⁾, 青木大典¹⁾, 大塚真帆¹⁾, 宮脇亮輔¹⁾, 磯山直也¹⁾, 内山英昭¹⁾, 清川清¹⁾
Takuma SUGINOMORI, Daisuke AOKI, Maho OTSUKA, Ryosuke MIYAWAKI,
Naoya ISOYAMA, Hideaki UCHIYAMA, and Kiyoshi KIYOKAWA

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

(〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5, {suginomori.takuma.sm4,aoki.daisuke.aa2,
otsuka.maho.oh2, miyawaki.ryosuke.mp5, isoyama, hideaki.uchiyama, kiyo}@is.naist.jp)

概要:「猫は液体である」という一種のジョークがインターネット上ではささやかれている。これは、猫が身体的な柔軟性に富んでおり、自分の身体より狭い場所を通ったり、小さい容器に合わせて入ったりすることが可能なことに起因する。そのジョークから着想を得て、Virtual Reality 環境で人間も固体から液体になるような体験ができないかと考えた。そこで本稿では、視覚的に液体のようになる様子の提示と実物の触覚提示を行い、「身体が溶ける」という新しい体験をユーザに与える手法を提案する。具体的には、自分の手が高い柔軟性を持ち、液体のように容器に収まる体験を与える。

キーワード: Head Mounted Display, 身体所有感, 液体感覚, クロスモーダル現象

1. はじめに

「猫は液体である」というジョークがあるように、猫は非常に柔軟性に富んでおり、自分の身体より狭い場所を通ったり、お椀型の容器に合わせて身体を変形させたりすることが可能である。一方で人間の身体は猫よりも少ない骨や柔軟性の低い筋肉などで構成されており、身体の形状が崩れないようになっている。

そこで本稿では、Virtual Reality (VR) 環境で自分の身体が液体であるかのように提示し、その液体に対して身体所有感を得られる体験システムを提案する。このシステムの実現には①VR 環境のアバタに身体所有感を得るという課題、②材質の異なる物体に対して身体所有感を得るという課題の二つを解決する必要がある。実現できれば VR 環境での身体所有感について新しい切り口になると考えている。そこで人間の材質認知による身体材質錯覚を利用して課題を解決し、猫の例と同様に本来は腕が収まらない壺に腕が溶けて収まる体験を実現することを目的とする。提案システムにおける課題を以下に示す。

Q1. VR 用の Head Mounted Display (HMD) による視覚提示と壺デバイスを用いた触覚提示によって溶けるという体験を得られるか

Q2. 溶けるという体験はどのような条件やパラメータ (e.g., 視覚, 触覚, 温感) にどの程度依存するか

2. 関連研究

Botvinick らは本来自分の身体ではない別の物体に身体所有感を得られることを明らかにした [1]。実験では、自分の手を隠した状態で別の物体 (ゴム状の手腕) と自分の手の両方に同じ刺激を与えると、別の物体に対して身体所有感が得られた。これは、視覚から予測される触覚と実際の触覚が一致したときに、視覚で得られた物体に対して身体所有感を獲得できるということを示している。したがって、VR 環境での触覚を実環境のユーザの身体にフィードバックすることは非常に重要である。

Oyanagi は液体に対して身体所有感を得る方法について研究を行った [2]。水の拡散・収縮をユーザの手の開閉に合わせることで身体所有感が得られると報告されている。つまり、形状や材質が変化したとしても、自分の動きに同期させた視覚的フィードバックができれば身体所有感を得られるということがわかる。

Senna らが報告した “The Marble-Hand Illusion” では、被験者の手をハンマーで優しくたたきながら大理石をたたきときの音を提示することで、被験者自身の手が硬く、重く、より硬直の状態であるように感じることを示した [3]。文献[3]ではこの錯覚を Marble-Hand Illusion (MHI) と呼ぶものとしている。この研究では三つの実験を通して、触覚と聴覚刺激が同期されている場合に有効であること、同期

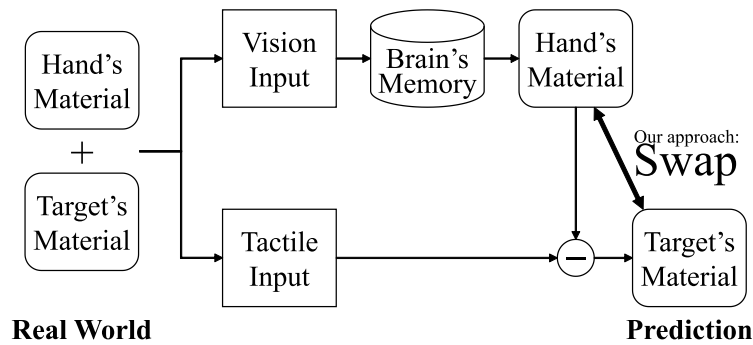


図 1: 人間の材質予測を利用した自己身体の材質予測

されていても物質的情報をもたないような聴覚刺激（純音、440Hz）を与えた場合は効果がないこと、MHI がハンマーが手に当たったことによるものではないことを示した。この研究では、主観的評価として実験の事前と事後のそれぞれで手の感じ方についてのアンケートを、そして客観的評価としてガルバニック皮膚反応による生理的な測定を行っていた。

文献[3]の研究で重要な点は2点ある。1点目は、聴覚的なフィードバックを操作することで身体の材質の認識が変化することである。2点目は、人間の身体の素材のように状態が不変なものであっても、入力される感覚情報によって知覚が即座に更新されることである。

以上の関連研究を踏まえて、提案システムの立ち位置と新規性を明らかにする。提案システムは文献[3]と同様に、人間の手に対する知覚・認知を操作することを試みる。その一方で、大理石のように硬い素材ではなく「液体」を表現の対象とする点において提案システムは特徴的である。

硬い素材をたたいたときとは異なり、液体は聴覚的フィードバックが期待できない。そのため後述する手法では、文献[1]の研究と同様に視覚と触覚の身体所有感に着目し、VR 環境での視覚と実環境での触覚の差異を知覚させることで液体になる錯覚を提示する。

3. 提案手法

3.1 概要

VR 環境で材質の異なるアバタに対して身体所有感を得るためには、触覚フィードバックが重要である。そこで、人間の材質の予測方法（図 1）を利用して、視覚と触覚によって仮想物体の材質を確実に予測できる状態にし、その材質と比較して自分の身体の材質を予測させる。それを踏まえて、本提案の目的を達成するために「仮想物体やアバタの材質を視覚的に提示する視覚提示システム」と「ジェルによる低粘度な触覚と振動による内部的な触覚を与えることができる壺デバイス」の構築を目指す。

3.2 人間の認知モデルの仮定

人間が自分の身体を含む様々な物体の材質を知覚する際に、バイズ理論的に材質予測をすると仮定する。事前情報としては手の材質や触れる対象の材質などが確率として記憶されている。その後、視覚・触覚から各材質の

尤度を求めて確率を更新する。例えば、事前に手の材質がゴムのような材質であると認識していた場合も、その後の視覚・触覚情報によって手の材質が液体である尤度が高くなれば、手の材質が液体であるという確率を高くできる。よって、手の材質を液体であると予測させるような感覚提示をすることで、自分の身体の材質が液体であると認知させられる。

3.3 自分の身体の材質の錯覚方法

視覚・触覚から手の材質が液体である尤度を高くする方法について考える。まず材質知覚の詳細な原理は現在の科学では正確に分かっていないが、予測に使用する情報として視覚・触覚を頼りに実現しているということは経験的に確かである。そして視覚を介した材質予測については、対象の物理挙動、光の反射・屈折、形状等から予測されていることが解明されつつある[4]。

更に触覚での材質予測について、われわれは経験則に基づき、触覚によって感じられた材質から、自分の身体の材質を引いて触れる対象の材質を予測していると考えた。つまり、「(対象の材質) = (触覚によって感じた材質) - (人間の材質)」という関係である（図 1 での入替え前）。ここで、自分の身体の材質は記憶中の基本情報であるため尤度が高い。結果として人間の材質は一定であると認識して処理される。一方で、自分の材質の尤度よりも対象の材質の尤度を高くすれば、この処理を逆手に取ることができ、人間の材質が変化すると錯覚させられる。

その方法としては、VR 環境では対象の材質や仮想の身体の材質を視覚的に提示し、実環境では本来その物に触れた場合よりも粘性のある材質を触覚的に提示する。そうすることにより、手の材質の尤度を下げ一方で、対象の材質の尤度を上げられる。

上記のことから、触覚によって感じた材質から対象の材質を引くことにより、人間の材質を予測させられると考える。その関係は、「(人間の材質) = (触覚によって感じた材質) - (対象の材質)」となる（図 1 での入替え後）。よって、手が液体であるという確率が上がったように錯覚させられる。

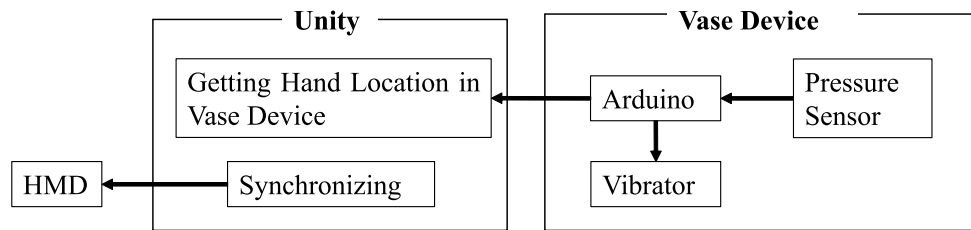


図 2: システム概要図

3.4 提案システムに求める要求

提案手法を実現するために、システムは次の点を満たして実装されるべきである。

- 視覚と触覚の提示によって、手の材質認識は鈍らせ、対象の材質は強く認識させる。
- VR 環境と実環境での身体の動きを同期させる。

具体的には、最初に堅い材質でできた壺を VR 環境で視覚的に表現し、ユーザが VR 環境で壺の口に触れる。このとき、実環境でも壺デバイスの口に触れるようにする。これによりユーザは、壺を堅い材質であると認識する。その後、壺内部に入った手が溶けてゆく映像と手が溶けた感覚を壺デバイスのジェルや振動装置によって提示する。これにより、液体となった手に対して身体所有感を得ることが期待できる。

また、文献[2]では身体の動きに同期させた視覚的フィードバックが、VR 環境の身体に対して身体所有感を得るための重要な要素であるとされている。そこで、壺デバイス内部での手の動きを検知し、液体の動きを同期させるという視覚的フィードバックをする。

4. 提案システムの実装

4.1 概要

本節では液体化錯覚システムの提案を行う。システムの概要を図 2 に示す。このシステムは壺デバイスと VRHMD を用いる。壺デバイスでは、被験者が実環境で手を入れることで簡易的な触覚提示を行う。HMD では、壺デバイスの触覚提示に加えて視覚刺激を提示する。この視覚刺激には、VR 環境の手腕が液体に変化する様子の提示を行い、クロスモーダル現象による錯覚を生起させ、身体が溶けるという新しい表現を実現する。

体験時には、被験者は HMD 上に表示される指示に従って壺デバイスに手を入れる。このとき、壺デバイス内では手の位置情報を RGB カメラ等で取得することができないため、壺デバイス内に感圧式タッチセンサを組み込む。これにより、デバイス内に手や腕が隠れた場合であっても位置情報を取得できる。再現を目指すパターンは以下の通りである。

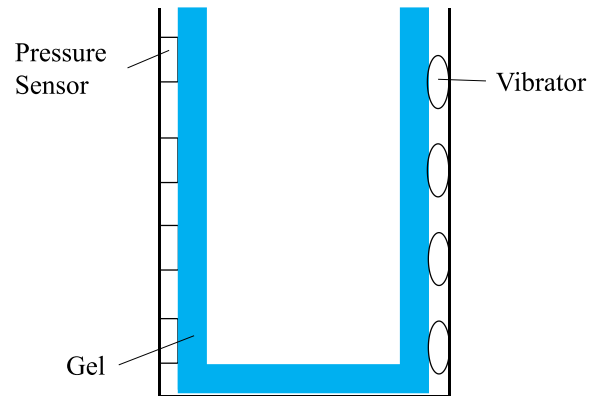


図 3: 壺デバイスの構成

粘性パターン

- ・柔らかいゴム質
- ・蜂蜜のような粘度の高いもの
- ・水

壺パターン

- ・金魚鉢のような形状
- ・縦に細長い形状
- ・渦巻くような形状

4.2 視覚提示システム

HMD 上で自分の手が液体のようになり、本来なら手が入らないような壺に手が入って行く映像を VR 上で表示する。また、壺デバイス内のタッチセンサをデータ処理したものを Arduino から Unity に送信し、手の位置情報を同期する。

4.3 壺デバイス

壺デバイスの構成を図 3 に示す。壺デバイスは基本的には筒の形をしている。壺デバイスでは、手の材質が変化した感覚を得る体験をより向上させるために、振動機構とジェルによる簡易的な触覚提示を行う。外装の堅い材質に触れてしまうと、映像から視覚的に予測される触覚と差異が生じ違和感の原因となる。ジェルはその違和感を防ぐ目的で袋に包み壺デバイスの内部に設置する。また、振動機構を壺デバイスの内側にいくつか設置する。振動によって、ファンタムセンセーションを発生させ、視覚とリンクした刺激が感じられることを期待する。振動のタイミングはタッチセンサによって取得した手の位置と映像上での液体の状態に同期させる。



図 4: 壺の種類

5. 実験内容

被験者には自分の手の柔軟性が高くなり、猫のように細いところでも手を通るといった体験を提供する。壺の形状および手の粘性はそれぞれ3パターン用意する。以下に実験手順を示す。

1. HMD を装着する。
2. 壺パターンの中から任意の順に壺を選択する (図 4)。
3. 選択した壺の口に触れる。
4. 手を壺の中に入れる。手は壺に触れた部分から液体のようになり、壺の形状に従って変形する (図 5)。

手順 1・2 は準備段階であり、実験が行われるのは手順 3・4 である。手順 3 では、被験者は VR 環境の壺と実環境の壺を同時に触れることになり、VR 環境の手のアバタに対して身体所有感を得る事を想定している。手順 4 では、実環境では壺デバイス内部のジェルと振動によって触覚が得られる。また、タッチセンサによって手のセンシングが行われ、手の動きが液体に反映される。以上のことから、視覚と触覚の感覚間相互作用によって液体に対して身体所有感を得ることが期待される。

6. 評価方法

本システムの錯覚の効果を評価するために、被験者 (システム体験者) は次に示す三つの条件についてそれぞれ体験し、評価を行う。

1. HMD と壺デバイスによる視覚・触覚刺激が提示される。
2. 壺デバイスの触覚刺激のみが提示される。
3. HMD の視覚刺激のみが提示される。

これらの条件に対して、前章で示した粘性パターンと壺パターンの順序効果を考慮し、カウンタバランスによって偏りを緩和する。また体験と評価の説明内容は統一する。

ここで、評価方法で考慮すべき点として視覚・触覚刺激の時間情報の一致を挙げる。例えば視覚・触覚刺激の遅延は身体所有感の消失に繋がりがかねない。参考として、Shimada らはラバーバンド錯視において視覚刺激と触覚刺



図 5: 手が溶けて壺に収まるイメージ図

激の遅延がある際の効果を調査した [5]。実験では 0-500ms の範囲で 100ms ごとに錯覚効果の強さを調査し、その結果、強い自己身体帰属感を得るためには 300ms 以下が好ましいとした。本提案システムにおいても、時間遅延を 300ms に抑えた上で実験を行う。

その他にも、HMD による視覚刺激の提示においては被験者によって手腕の大きさ、色、形が異なる可能性があり、結果に影響すると考える。この点についてはいくつかのパターンをあらかじめ用意しておき、被験者が体験するごとにそれらのパラメータを最適化する。そうすることで、実験条件のギャップが埋まることを期待する。

7. おわりに

提案システムでは「猫は液体である」という一種のジョークから発想を得て、本来腕が入りきらないような壺に腕が溶けて収まってしまふような体験を実現することを目的とした。今後は、提案システムを実装し、複数人を対象に評価実験を行う。提案システムの実現は、①VR 環境でのアバタに身体所有感を得るという課題と②材質の異なる物体に身体所有感を得るといった課題の解決例となり、VR 環境での身体所有感についての新しい切り口となる。

参考文献

- [1] M. Botvinick and J. D. Cohen, “Rubber hand ‘feels’ what eyes see,” *Nature*, vol. 391, no. 6669, p. 756, 1998.
- [2] A. Oyanagi and R. Ohmura, “Liquid Hand Illusion 液体に対する身体所有感の生起に関する研究,” 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, -2C-05-, 2019.
- [3] I. Senna, A. Maravita, N. Bolognini, and C. V. Parise, “The marble-hand illusion,” *PLoS One*, vol. 9, no. 3, pp. 1–6, 2014.
- [4] S. Nishida, “「多元質感知」における質感研究,” *日本画像学会誌*, 第 57 巻, pp. 189–196, 2018.
- [5] S. Shimada, K. Fukuda, and K. Hiraki, “Rubber hand illusion under delayed visual feedback,” *PLoS One*, vol. 4, no. 7, pp. 1–5, 2009.