



重さ表象に関わるエッセイの質的分析を通じた 重さ知覚誘発要因の探索

平尾悠太郎¹⁾, 畑田裕二²⁾

1) 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学領域 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地-5, yutarohirao@gmail.com)

2) 東京大学大学院情報学環 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, hatada@nae-lab.org)

概要: Pseudo-haptics 技術とは、認知過程における感覚情報の相互作用を利用し、身体動作に対する多感覚フィードバックを適切に変化させることで疑似的な触覚を提示可能にする技術である。しかし、Pseudo-haptics の生起メカニズムについては未だ不明な点も多く、Pseudo-haptics の実用的な設計指針は存在しない。そこで本研究の目的は、Pseudo-haptics を生起させる感覚手がかりの規則を解明し、感覚手がかりの、より効果的な設計指針を構築することである。これまでの Pseudo-haptics 研究では、感覚手がかりを、感覚情報間の時間的・空間的ズレの許容範囲といった観点から主に検討してきた。これに対し本研究では、感覚手がかりを意味的制約という新たな観点から再検討することを目的とし、その予備的検討として、「重い・軽い」に関する経験談の質的な分析を通して重さ表象がどのような知覚体験や言語的实践に支えられているのかを探索する。

キーワード: 疑似触覚, Pseudo-haptics, 質的研究, 重さ

1. はじめに

バーチャル物体とのインタラクションにおける触覚提示手法として、人間の認知過程における感覚情報の相互作用を利用し、ユーザの身体動作に対する視覚や聴覚などの感覚フィードバックを適切に変化させることで触覚を変容可能にする、Pseudo-haptics 技術が盛んに研究されてきている [1]。本技術は複雑な触覚デバイスなしに、主に視覚や聴覚刺激の工夫で触覚を編集可能な点が強みである。一方で、Pseudo-haptics の生起メカニズムは未だ完全には解明されておらず、そのため Pseudo-haptics を生起させるための感覚手がかりについては、感覚情報間の時間的・空間的ズレの許容値といった観点での実装による、場当たりの現象の確認がほとんどであった。

しかし、視覚聴覚刺激の意味的まとまりである視覚聴覚表象が、どのような触覚表象に寄与し得るかという、感覚手がかりの意味的制約についてはこれまで十分に検討されてきていない。初期の先行研究ではこの意味的制約として「物理法則に基づいて設計すべき」という指針が提案されているものの [2]、後年の研究において物理法則には則っていないが Pseudo-haptics を生起させられる感覚刺激も確認されていることから [1]、Pseudo-haptics の設計指針を構築する上で感覚手がかりにおける意味的制約の再検討が必要である。そこで本論文ではその予備的検討として、物体の触覚的特性において最も重要な要素の一つである重さに着目し、「重い・軽い」に関する経験談の質的な分析を通して重さ表象がどのような知覚体験や言語的实践に支えられているのかを明らかにし、物理量だけでは汲み尽くせない重さの表象を探索する。

2. 調査: データ収集とデータ分析

2024 年 5 月に筆頭著者が奈良先端科学技術大学院大学にて行った VR 技術に関する講義において、受講者である同大学の学生 117 名を対象に次の内容の経験談を自由記述のエッセイとして回答するように求めた: 「『重い』または『軽い』というキーワードから想起される、あなたの人生の中で重要な/大切な/鮮明な/印象に残っているエピソードを教えてください。特に、重さの質感(どのような、どの程度の重さ/軽さだったか)を当時のあなたの身体や心理状態に着目して記述してください。」本エッセイは授業の課題として出され、提出はオンラインシステムによって行われた。回答文字数は任意とし、余裕のある者のみ 400 字以上で回答するよう指示した。講義実施日から課題提出までの期限としては 3 週間が設けられていた。分析は、提出された回答のうち、日本語で回答された 77 件のエッセイ (男性 57 件, 女性 21 件; 1 年生 69 件, 2 年生 8 件; 文字数平均 505±198 文字) について行われた。得られたエッセイに対して、テーマティック・アナリシス [3] を参考にコーディングを行なった。まず筆頭著者が逐語録を読み込み、帰納的アプローチで予備的なテーマを作成した。その後、RQ に照らし合わせて演繹的アプローチでテーマをまとめた。各段階において、全ての著者を交えて結果の妥当性について議論した。

3. 結果と考察

本章ではまず、経験談から得られた五つの重さの意味的分類を述べ (3.1)、その後、重さ知覚の非対称性 (3.2) と重さの事前予測による重さ知覚への影響の二方向性 (3.3) について述べる。

3.1 重さの意味的分類

3.1.1 分類1：身体の制御可能性

第一に、重い・軽いという表現は、自分の身体を意のままに制御できる程度として用いられていた。得られた経験談の中では、身体的・心理的疲労などにより身体を思い通りに動かせない（例：P36）、心理的束縛によって自由に行動ができないという状況（例：P77）に対して「重い」という表現が用いられ、また逆に、他者からの応援や喜びの感情などにより「身体に翼/羽が生えたよう」な状態になったり（P20, P54）、緊張や重圧からの解放により身体の余分な力が抜けたり身体がスムーズに動かせるといった状況（例：P48）に対して「軽い」という表現が用いられていた。さらに、これらの経験談において身体が“重く”なっている状況では「自分の身体が鉛のよう」（例：P27）で「自分の身体ではないかのよう」（P54）に感じられるといった表現もなされていた。このように、身体の制御可能性の程度が自己の身体性に影響することは先行研究でも指摘されており [4]、本分類は、重さ表象と身体性が密接に結びついていることを示唆している。

3.1.2 分類2：モノ・コトに対する作用可能性

第二の分類は、身体能力の限界により物を持ち上げることが難しい（例：P28）、トレーニングや慣れにより過去持ち上げられなかったものが簡単に持ち上げられるようになった（例：P56）といった経験談に代表される、（自己の身体ではなく）物体（モノ）に対して自己が作用できるという程度を重い・軽いと表象しているケースである。これには、「簡単な試験/課題に安易な気持ちで臨む」（例：P74）ことを軽いと表現するように、事象（コト）に対する自身の作用可能性も含まれる。

典型的な Pseudo-haptics 技術では、バーチャル物体の移動量を実際のユーザ身体の移動量よりも少なく見せることで重さ知覚を生起させるが、バーチャル物体の移動量と実際のユーザの移動量の乖離が一定以上になると、バーチャル身体に対する身体性が低下し、インタラクションに違和感を覚え、重さ知覚が生起しなくなることが知られている [2]。この現象には、自分の（バーチャル）身体が動きづらいことによる重さ（分類1）と、バーチャル物体を動かすことによる重さ（分類2）が寄与している可能性が考えられる。そして上述のように、自身の身体の制御可能性という軸で語られる「重い」状態は身体性の低下を招く可能性がある。一方で物体への作用可能性に関する重さの経験談では身体性の低下は語られなかった。これらのことから、Pseudo-haptics 技術による重さ提示をする際、例えばバーチャル物体をバーチャル手によって掴んだ瞬間にバーチャル手を非表示にすることで、ユーザがバーチャル物体の動作（分類2）に着目するように誘導し、身体が動きづらいという認知（分類1）の生起、及びそれによる身体性認知の低下を緩和できる可能性が仮説として考えられる。

3.1.3 分類3：感情の時空間的な蓄積

三つめの分類は、感情の時空間的な蓄積の程度である。不安や悩み、プレッシャーといったようなネガティブな感情や、応援や活力・達成感などのポジティブな感情が、当人のキャパシティとの比較においてどれくらい大きく（空間的蓄積）、また時間経過によってどの程度蓄積しているか（時間的蓄積）という密度や体積が、重い・軽いと表現されていた。具体的には、不安が長期的に続いている状況が「心にまるい錘が一個ずつ溜まっていく」（時間的蓄積）と表現され、またその不安がより一層大きくなることが「錘がビリヤード大からボウリング大になる」（空間的蓄積）と記述されたり（P66）、また、白熱したリレーの最中に受け取ったバトンについて「仲間たちの期待と夢が詰まった（中略）全員の想いが凝縮された重さ」というような表現がなされたりしていた（P69）。なおその他にも、「期待」がプレッシャー（例：P67）にも活力（P69）にもなるように、文脈や個人の受け取り方によってネガティブにもポジティブにもなり得る感情も経験談の中で確認された。

感情の時空間的な蓄積としての重さは、上記分類1及び2と相互作用することも示唆された。ネガティブな感情が「重く」存在している時は身体的にも重く感じられ、動くこと（分類1）や何かを遂行すること（分類2）が難しくなる（例：P4, P73）。逆に分類1の例でも挙げたように、応援や期待といったポジティブな感情の蓄積が身体に活力をもたらす「身体に翼が生えたよう」な身体的軽さ（分類1）や、「無限（に物事を遂行できる）」という感覚（分類2）が生起することも述べられていた（例：P20, P73）。一方で経験談ではこれらの逆も成立しており、身体的不調などで身体が重く感じられることでネガティブな感情が蓄積し（例：P10）、また精神的に活動できているという自覚によってポジティブな感情が生起する（例：P70）という記述も見られた。さらに、これらネガティブとポジティブな感情は表裏一体の関係にあることも示唆された。すなわち、「重圧や不安からの解放」というようにネガティブな感情が軽減・消滅することで「まるで重い鎧を脱ぎ捨てたかのような身体的な軽さを覚え（例：P75）、また「活力がなくなる」というようにポジティブな感情が減少・消滅することで「何もできない」状態に陥る（例：P73）といったことが示唆された。

これまで感情への作用を考慮した Pseudo-haptics 技術は筆者らの知る限り検討されていない。しかし、以上の知見を考慮することで、新たな Pseudo-haptics 技術を設計できる可能性がある。例えば、特定の感情と関連の深い身体・生理反応を再現することで、適及的にその感情を誘発できるといった研究になぞらえ [5]、感情の高まりと関連の高い「鳥肌」を誘発するような視聴覚刺激をバーチャル物体とのインタラクション中に提示することで、その重さ知覚を変容させるといったような手法も検討の余地がある。

3.1.4 分類4：外界の推定精度の高さ

四つめの分類として、人が多感覚情報を統合し外界を推定する精度の高さ、すなわち推定の尤もらしさを重さとし

て表現される事例が見られた。具体的には、参加者が夢にまで見たオーロラを実際に目の当たりにした際に「写真で見て想像していたものとは違ったけれど、それが現実であるという重みを感じました。」といった記述 (P65) や、「非日常感が『軽さ』を作り出し、そこから現実への引き戻しというギャップに『重さ』を感じた」(P38)、さらには「初めて彼女が出来たとき、(中略) そのときの心境はずっとふわふわしていた」(P37) などのように、物事の存在感や現実感の高さが重い・軽いと表現されていた。

人は外界を推定するために、多感覚情報をその信頼度と事前知識に基づいて統合し、ベイズ推論的に一つの尤もらしい解釈を構成することが複数の研究で示唆されている [6]。このモデルによると、人間の認知は確率分布によって成立しており、その認知の信頼度の高さ、すなわち外界の推定精度の高さは、外界の推定に寄与する感覚手がかりの多さと、各感覚情報の信頼度の高さ (確率分布の分散の小ささ) に依存すると考えられる。この観点から得られた経験談を再考すると、写真のオーロラから得られる比較的信頼度の低い視覚情報よりも、現前するオーロラから得られる比較的信頼度の高い多感覚な情報の方が、質が高く量が多いと捉えられ、結果的に情報の詰まった「重い」=「リアルな・存在感のある」ものとして認知されたと考えられる。

一方、人の認知モデルとして、上述したベイズ推論モデルから発展し、以下で説明する自由エネルギー原理も盛んに検討されている [7]。自由エネルギー原理では、脳内における外界のモデルから現在直面する状況において得られる感覚入力を予測し、その予測と実際に得られる感覚入力の予測誤差が最小となるように外界の推測結果や外界のモデル、もしくは行動を修正するという説明がなされる。この時、経験談で得られたような非日常的な状況や夢見心地な状態というのは、上述した予測誤差が大きく適切に外界を推定できていない、適切な外界のモデルを構築できていない、または得られる感覚入力が限定的であるといった状態であると考えられる。この外界を適切に認知できていない状態が経験談の中では「軽い」と表現されていることが示唆された。

これらの知見を踏まえると、未だ機序が明らかになっていない触覚の認知特性についても新たな考察を追加できる可能性がある。例えば Gaffary らは光学シースルーの HMD を用いて物理環境にバーチャルなピストンを配置する場合 (AR 条件) と、バーチャル環境を物理環境に重畳したシーンにバーチャルなピストンを配置する場合 (VR 条件) において、それぞれバーチャルなピストンの硬さ知覚を計測した結果、AR 条件の方が VR 条件よりもバーチャルなピストンが柔らかく知覚されることを発見した [8]。彼らはその明確な認知機序については考察していないが、上述した外界の推定精度の高さという観点から本結果を考察すると、AR 条件ではリアルな (重い) 物理環境にバーチャルピストンが配置されることで、バーチャルピストンの非リアルさ (軽さ) が強調され、結果的に硬さ知覚にも影響を及ぼした可能性が考えられる。

3.1.5 分類 5：対象の価値の大きさ

五つめの分類として、当人が対象に感じる価値の大きさが挙げられる。具体的には、人間関係の構築の仕方について、少数の他者と親密な関係を構築しようとする人が「重い」と表現され、また多数の他者と表面的な関係を構築しようとする人が「軽い」と表現されていた (例：P15)。また「一般的には心理的に重いものになるのですが、自身の感じ方としては思った以上に軽かったものとして (中略) よく知る父が血の繋がった人物ではなかった」(P52) に見られるように、対人関係や事象に対して当人が感じる価値や重要度も「重い・軽い」という言葉で表現されていた。これは、人が質量的に重いものの方が高価で重要なものを感じるという先行研究の知見にも合致している [9]。

3.2 重さ知覚の非対称性

経験談は全体的に重さに関するものの方が軽さに関するものよりも多かった。さらに軽さについては重さの経験談に付随して語られることが多く、軽さに関する経験談が単独で語られることは少なかった。具体的には、得られた経験談のうち、重さ単独、軽さ単独、両方について語られたものはそれぞれ、30 件、5 件、42 件であった。そもそも「重い・軽い」という認知は相対的なものであると考えられ、経験談においても常に参加者の普段の状態や能力、過去の経験や知見による重さの予測との比較において「重い・軽い」が認知されていた。ここで、人間が自然体としてただ存在している状態を基準とすると、人間は普段の生活においてその基準から質量が減る経験は少なく、「重い」経験が先行することの方が多くと考えられる。このように、重さと軽さは体験の生起順序や経験頻度において非対称である可能性が考えられる。実際、Pseudo-haptics 技術に関する先行研究においても、軽く知覚させる視覚刺激よりも重く知覚させる視覚刺激の方が人間は気づきやすいという結果が得られており [10]、本考察とも合致する。

3.3 重さの事前予測による重さ知覚への影響の二方向性

経験談では、過去の記憶や経験から構築された重さ知覚の予測が、その後の重さ知覚において逆方向と順方向のどちらにも作用し得ることが示唆された。逆方向の具体例として、「(物体を持ち上げる際) 前が屈強な男性であり、『思ったより重い』と言いながら持ち上げている時は、私は軽く感じやすいように思う」(P61)、「拍子抜けしたほど軽く感じました。(中略)『あの時大変だったな』と思い出話をする度に、記憶の中でテレビを実際より重くしていったのかもしれませんが」(P55) などのような経験談が得られた。一方順方向の具体例として、「(願いたいことが叶いにくい時は重く感じるという言い伝えのある“おもかる石”について) 願いたいことが大きくてそれを叶える自信がないときは、重く感じたことが多い」(P61) や「(部活動中の極限の疲労状態において“今の状態で押せるわけがな”といった思考で頭がいっぱいになりました。(中略) その後の人生でこれ以上に肉体的に『重い』とを感じることはなかった」(P43) などの経験談が得られた。

先行研究においても、人間の重さ知覚における予測の影響については逆方向と順方向のいずれの現象も確認されている。逆方向の具体例としては、同じ質量で同じ見た目の物体においては、サイズが大きい方が軽く知覚されるという Size-Weight Illusion[11] が代表的である。一方で、典型的な Pseudo-haptics 技術である視覚的移動距離の減衰手法に代表されるように、ベイズ推論モデルを用いて説明がなされる現象は、主に予測の順方向の影響を示唆している [1]。しかし、予測の影響の方向に関する認知機序については未だ明確な説明がなされていない。

本研究においてもこの点に関する明確な機序が解明されるわけではないものの、上記の経験談を本研究で得られた重さ表象の分類から検討することで、その機序の議論に新たな考察を追加できる可能性がある。上述した逆方向の経験談ではそのすべてが分類2の作用可能性という観点から語られているのに対し、順方向の経験談では分類3の感情の時空間的蓄積を含んだ重さの記述として解釈できる可能性がある。まず逆方向の影響に関して、作用可能性の観点から構築される重さの予測は、脳内の動力学計算に用いられ、その予測結果と実際の感覚入力との誤差を修正するために、ここでは主に重さの予測や推定が更新されると考えられる。ここで、上述の通り人間は「重い・軽い」を相対的な量として認知していることから、この予測誤差による重さ推定の修正の方向によって重い・軽いという認知が形成されていると考えられる。一方順方向の影響に関して、「自信がない」「(できないという)思考で頭がいっぱいに」という記述からも見られるように、これらの経験談ではネガティブな感情に語りの焦点が置かれている。この場合、当人は運動遂行や重さ推定のためだけに重さの予測を行っているのではなく、上述した予測誤差修正以外の認知処理が「重い・軽い」認知に寄与している可能性がある。

4. まとめ

本研究は Pseudo-haptics 技術の感覚手がかりにおける意味的制約の検討を最終目的とし、その予備的検討として、「重い・軽い」に関する経験談の質的な分析を通して重さ表象がどのような知覚体験や言語的実践に支えられているのかを探索した。分析の結果、「身体・行動の制御可能性」「モノ・コトに対する作用可能性」「感情の時空間的な蓄積」「外界の推定精度の高さ」「対象の価値の大きさ」という五つの重さ表象の分類が得られた。さらに、「重い・軽い」が非対称的であることや、重さの予測が重さ認知に及ぼす影響の方向に関して新たな観点から考察を加えた。ただし本研究の限界として、経験談の収集時に「重要な/大切な/鮮明な/印象に残っているエピソード」と教示したことが、集まったエピソードに影響を与えた可能性があること留意されるべきである。今後は、本研究で得られた知見をもとに、Pseudo-haptics 技術に関する新たな仮説の検証、及び手法の提案を行い、その効果を実験によって検証していくことで、Pseudo-haptics 技術の感覚手がかりにおける意味的制約を加味した設計指

針を構築する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 23K20007, 24K20812, 24K20818 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Yusuke Ujitoko and Yuki Ban. Survey of Pseudo-Haptics: Haptic feedback design and application proposals. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 699–711, December 2021.
- [2] Andreas Pusch and Anatole Lécuyer. Pseudo-haptics: from the theoretical foundations to practical system design guidelines. In *Proceedings of the 13th international conference on multimodal interfaces*, pp. 57–64, 2011.
- [3] Virginia Braun and Victoria Clarke. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative research in psychology*, Vol. 3, No. 2, pp. 77–101, 2006.
- [4] Konstantina Kilteni, Raphaela Groten, and Mel Slater. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 21, No. 4, pp. 373–387, 2012.
- [5] Silvan Tomkins. *Affect imagery consciousness: Volume I: The positive affects*. Springer publishing company, 1962.
- [6] David C Knill and Alexandre Pouget. The bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *TRENDS in Neurosciences*, Vol. 27, No. 12, pp. 712–719, 2004.
- [7] Karl Friston. The free-energy principle: a rough guide to the brain? *Trends in cognitive sciences*, Vol. 13, No. 7, pp. 293–301, 2009.
- [8] Yoren Gaffary, Benoît Le Gouis, Maud Marchal, Ferran Argelaguet, Bruno Arnaldi, and Anatole Lécuyer. Ar feels “softer” than vr: Haptic perception of stiffness in augmented versus virtual reality. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 23, No. 11, pp. 2372–2377, 2017.
- [9] Nils B Jostmann, Daniël Lakens, and Thomas W Schubert. Weight as an embodiment of importance. *Psychological science*, Vol. 20, No. 9, pp. 1169–1174, 2009.
- [10] Yutaro Hirao, Tomohiro Amemiya, Takuji Narumi, Ferran Argelaguet, and Anatole Lécuyer. Leveraging tendon vibration to enhance pseudo-haptic perceptions in vr. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023.
- [11] J Randall Flanagan and Michael A Beltzner. Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size-weight illusion. *Nature neuroscience*, Vol. 3, No. 7, pp. 737–741, 2000.