

食いしばり行動での操作による仮想物体の重量感呈示

盛川浩志^{†1,†2} 河合隆史^{†2}

仮想物体を操作する際に「歯を食いしばる」ことで、その仮想物体に対して重量感を知覚させる手法を提案する。食いしばる行動に伴い側頭筋が隆起することに着目し、頭部に装着したバンドの張力変化をロードセルで計測することで、噛む力の強弱を検出した。噛む行動で仮想物体を持ち上げるタスクを課し、持ち上げに必要な力を変化させる実験を行ったところ、強く噛まないで持ち上がらない物体ほど重く感じられることが示された。

1. はじめに

本研究では、他感覚刺激の相互作用を利用したクロスモーダルインタフェースの検討として、仮想物体操作時のユーザの振る舞いを利用して触力覚を感じさせる手法について提案する。具体的には、重いものを持つ際に力をいれる状況を再現させる行動として、「歯を食いしばる」行動に着目し、食いしばる行動によって物体を操作するインタフェースを構築することで、重量感を呈示することを目的とした。実際に構築したインタフェースシステムの評価を通して、実際に重量感を呈示できたかについて検証を行った。

現実空間で重量物を持ち上げる際には、脚部や腕部だけでなく、全身の筋肉を緊張させることは経験的に多くの人が知っていると考えられ、仮想空間での物体においても、筋肉の緊張を伴う操作であれば、その緊張量に応じた重量が感じられると予想される。

しかしながら、腕部などに反力を呈示する機構などによって物理的に正しい重量負荷をユーザに与えることは、機構が複雑化することによるコストの増加、可動域や操作範囲の限定といった問題を生じると考えられる。そうした課題に対し、簡便な装置によって筋力の緊張を測定し、仮想物体の操作に適用することで、重量感を呈示することが可能になるとの発想を得た。一方で、腕や足といった部位の筋肉を緊張させる操作を求めることは、コントローラ操作や移動を妨害する要因になりえるため、ユーザ体験を損ねるインタフェースとなることが懸念される。そこで歯を食いしばるという行動に着目し、側頭筋の緊張を測定し、その強度に応じて物体操作を行うインタフェースを提案する。

「食いしばる」という行動に着目した理由としては、「重いものを持ち上げるという行為と、歯を食いしばるという行為が直感的に結びついて捉えられること」、「噛む強さという入力信号が連続的な値として取得できること」、「歯を食いしばるという行動が容易に実行可能であること」が挙げられる。特に重量物を持ち上げる行動として自然であることが、重量感の想起に効果があると期待される。

また、実際に重量にかかわる触力覚をフィードバックしなくとも、ユーザの操作における振る舞いや行動の様式を

制御することで、反力や触覚を呈示するという試みは、クロスモーダル的な刺激呈示の一つとも捉えられる。

本研究ではシステムへの入力とその反応の操作という方法ではなく、インタフェースを操作する際の行動や振る舞いに対して操作を行うことで、触力覚に関連した重量感を呈示するという手法の提案と、その評価について報告する。

2. 先行研究

視覚や聴覚刺激の操作によって、触力覚を呈示しようとする試みとして、クロスモーダル現象を利用した錯覚による感覚呈示にも注目が集まっている。クロスモーダル錯覚による感覚呈示では、実際の入力に対する視聴覚刺激の操作や反応量の制御によって、多様な感覚の想起や創造を行うことを意図している。

クロスモーダルによる錯覚を用いた反力の呈示については、Pseudo Haptics (疑似触覚) としてよく知られているが[1]、ここでは特に重力感覚に対するクロスモーダル錯覚の試みについて挙げる。

鳴海らは、人間が物体を把持する際に「明度が低い物体ほど、重量が重く見積もられる」という知覚特性を利用し、体験者が実際に物体を持ち上げる際に AR グラスを通してその物体の明度を変化させることで、主観的な重量感覚を変化させ、疲労を軽減させられることを報告している[2]。

また満田らは、手首や足首を空気圧により圧迫する手法によって、現実で物体を把持した際に負荷のかかる部位とは異なる部位に対して負荷をフィードバックさせることによる重量感覚の表現を行っている[3][4]。

平尾らは、おもりを手で持って上に持ち上げるという動作に対して、現実空間と VR 空間で「移動量を減少」および「動作を遅延」させることで重量感を呈示する試みを行っている[5]。對間らはおもりを手で持って持ち上げるという動作において、現実の手の上にイージングをかけた手のモデルを重畳表示させることで、重量感覚が呈示されることを報告している[6]。

これらの報告の多くは、仮想空間内で操作対象となる物体や、操作者の身体表現に視覚的な操作を加えることで、

^{†1} 東京工科大学
Tokyo University of Technology

^{†2} 早稲田大学
Waseda University

クロスモーダル錯覚による重量感呈示を試みている。実際の身体に対して物理的なフィードバックを行った例もあるが、システム側から刺激が呈示されるという点では、他の先行研究と同様である。

これらの研究に対し、本研究で提案する手法は、システム側からの刺激の呈示や制御ではなく、操作者自らの行動を利用して重量感を呈示するという点で発想を異にする。

食いしばる行動を利用したインタフェースの先行事例も存在する。例えば Xu らは、実際に板状のセンサを噛むことで、咬合力による操作を可能にするインタフェースを開発している[7]。Paul らは、前額部に貼り付けるシート型電極デバイスを開発し、EOG と EMG の測定によって複数の種類の入力可能なインタフェースを提案している[8]。

これらの報告は、噛むという行動を利用したインタフェースに関連しているが、物理的なデバイス開発を主としており、食いしばるというユーザの行動から触力覚のクロスモーダル錯覚を想起させるという本研究の視点とは異なっている。

3. インタフェース概要

3.1 操作方法

本研究で提案するインタフェースは、仮想空間内で物体を把持し、移動させるという操作を想定したものである。物体の把持を行う操作として、ユーザの食いしばるという行動に伴う「噛む力」を検出し利用する。

インタフェースの画面イメージを図 1 に示す。ユーザが HMD を装着すると、視界の中心にカーソルとなる白い円と、上下の歯のアイコンが頭部の動きに連動して表示される。その上下の歯のアイコンは、ユーザが何も噛んでいない（力を入れていない）状態だと開いたままになっているが（図 1 左）、ユーザが歯を食いしばることで、その上下の歯のアイコンが閉じるようになっている（図 1 右）。

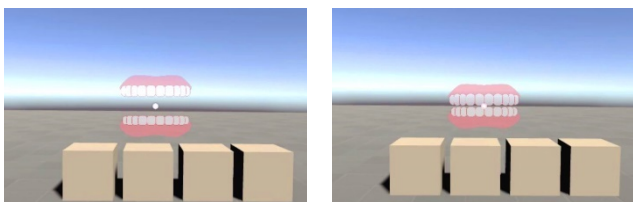


図 1 インタフェースの画面イメージ

ユーザはカーソルを物体に合わせ、歯を食いしばることで物体を把持する。食いしばった状態を維持したまま、頭部を移動させることで物体を移動させる。その後、食いしばる力を弛緩させることで、物体の把持が解除される。

操作する物体には仮想の重さを設定され、噛む力の強さに応じた重さの物体を持ち上げることができる。つまり、VR 空間内での重い物体は、ユーザが強く噛まないで持ち上げられないというインタラクションが付加されている。

3.2 食いしばる力の測定

食いしばる力の測定にはできる限り低侵襲な手法を採用することとした。先行研究では、実際に口腔内にデバイスを挿入する方法などがあったが、そのような手法は衛生面や心理的な面で障害があると考えられた。

具体的な測定方法として、筋電を計測する手法と、筋肉の緊張による側頭部の隆起を計測する手法を検討した。

予備実験として、筋電センサを用いる手法で計測を行った。食いしばるという行動は、通常は食べ物を咀嚼する行動と同じ筋肉を使用する。この筋肉を総称して「咀嚼筋」と呼ぶ。咀嚼筋には「側頭筋」「咬筋」「内側翼突筋」「外側翼突筋」の 4 種類の筋肉が含まれ、筋出力が高いほど筋肉に発生する筋電位も高くなる。そこで頬周辺に位置する「咬筋」に発生する筋電位を、筋電センサを用いて検出することで、食いしばりの強度とする方法を検討した（図 2）。

予備実験の結果として、筋電センサによる咬合力の計測は個人差が大きく、適切な位置に電極を張り付けたにも関わらず、うまく筋電位を検出できずにインタフェースを使うことができないというケースが発生した。

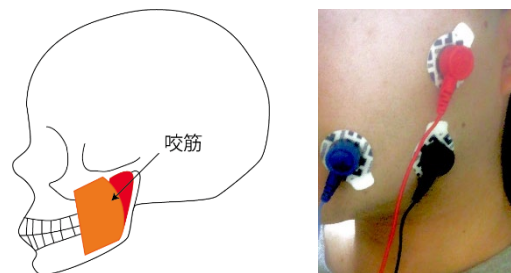


図 2 咬筋の筋電測定の電極位置

3.3 予備実験

予備実験においては、仮想空間内に同じ大きさで重さの設定が異なる 4 つの立方体を配置し、食いしばりの強度に応じて持ち上げ、持ち上げに要した食いしばりの強度の順に並べるというタスクを参加者に課した。

物体の重さは個人ごとの筋電の最大最小範囲を事前に計測し、その出力に対応する形で設定した。具体的には 20, 40, 60, 90[%] の 4 種類であった。画面のデザインは図 1 で示したものと同様のものを使用した。

この時、「重さ」や「重量感覚」という言葉は用いずに、あくまで「新しい入力インタフェースに関する実験」という説明のみ行って調査を行った。上記タスク後に自由回答を求めるインタビューで意見を収集した。参加者は 7 名であった。ただし前述の通り、筋電計測における不具合のため、タスクを完遂できたのは 7 名中 4 名であった。

3.4 結果

インタビューの結果で得られた意見のうち一部を次に示す。

- 噛む力の強いものと弱いものの差はよくわかった
- 重さに近い感覚はあった
- 歯のアイコンは自分の力の入れ具合がわかってよい
- 現在の最大値（重さ 90）よりちょっと低いくらいの重さを最大値にした方がよい
- 終わったあとに歯や顎の疲労感がある

実験に際して「重さ」に関する説明は行っていなかったが、実験を完遂できたすべての参加者が重さの感覚について言及した。また、重さ 90 に設定した立方体は持ち上げるのが難しいという意見が多かった。アイコン表示については好意的であったものの、自分の噛む力よりもアイコンの表示から重さ感覚を得ている可能性も示唆された。

これらの結果から、本手法によって重量感覚を想起できると期待された。本実験ではその特性を調査するため、筋出力と重さ感覚との対応関係を検討することとした。

一方で、筋電計測では安定した筋出力の検出が困難であると予想されたことから、側頭部の隆起を計測する手法についても予備調査を行った。

咀嚼筋に含まれる筋肉の中でも側頭筋は大きな筋肉であり、その収縮に伴って側頭部が膨らみ、頭部の周囲の長さに微小な変化が生じる。頭にベルトを装着し、頭部の周囲長の変化によるベルトの張力変化を、ひずみゲージを用いた力センサであるロードセルを用いて検出することで、食いしばりの強度を計測した（図 3）。

ロードセルでの張力変化測定では、個人差はあるものの、力を入れていない状態と入れている状態を判別できる程度の信号強度の差が計測されることを目視で確認した（）。ただし、測定値の絶対値はヘッドバンドの位置やベルトの締め具合によっても変化するため、キャリブレーションによって、0～100%の値に変換して使用することとした。

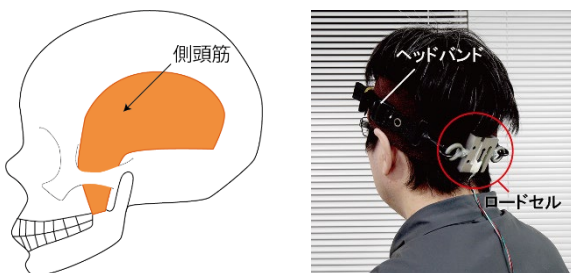


図 3 ロードセルによる側頭筋隆起の計測

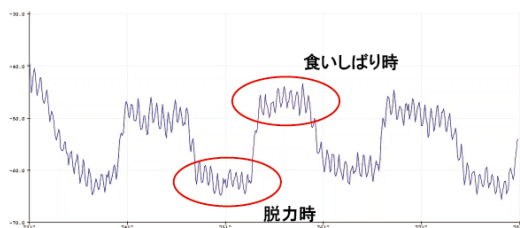


図 4 ロードセルによる計測信号

4. 実験

4.1 目的

本実験では提案する食いしばりによるインタフェースの重量感覚呈示にどのような特性があるのか、どのような要因がユーザの重量知覚に影響するのかを明らかにする事を目的とした。具体的にはマグニチュード推定法を用いて、物理量（VR 空間の仮想物体の重さ）と心理量（ユーザーが感じた重さ）の対応関係について評価を行った。

4.2 使用機材・環境

図 5 に本実験の実験環境と使用機材を示す。

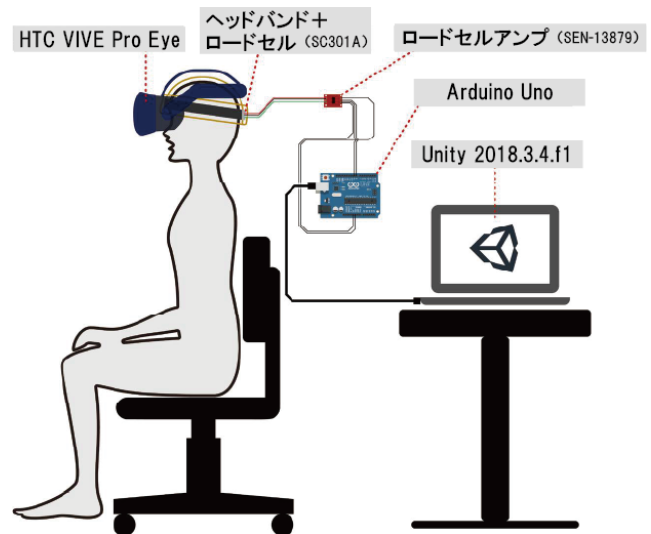


図 5 実験環境と使用機材

HMD には HTC VIVE Pro Eye を用いた。ただし視線計測機能は使用しなかった。ロードセルには SC301A (Sensor and Control Company Limited.)、アンプモジュールには SEN-13879 (SparkFun Electronics) を用いた。ヘッドバンドはナイロンベルトで、ロードセルにつけたアイボルトにナスカンで連結した。ロードセルアンプからの信号は Arduino Uno によってコンピュータに入力され、実験刺激は Unity で作成、呈示、制御を行った。

4.3 手続き

実験の開始から終了まではおおまかに以下の流れで行った。

- (1) 同意書記入
- (2) 実験説明
- (3) センサ・HMD 装着
- (4) キャリブレーション
- (5) 練習試行
- (6) 本試行
- (7) アンケート&インタビュー

練習試行においては、本インターフェースの操作感に参加者が慣れるために、正面に重さ 40[%]の同じ大きさの立方体を2つ表示し、それらを自由に持ち上げたり動かしたりする時間を約1分間設けた。なお、上部の赤い板は立方体を持ち上げてもらう際に、高さの条件を統一するために配置した目安である(図6)。本試行ではこの赤い板を超えない範囲で立方体を持ち上げるように指示した。

また練習試行、本試行ともに、予備実験時に表示していた歯のアイコンを非表示とした。これは、予備実験で得られた知見から、重量感覚の手掛かりとなる情報としてアイコンが用いられることを避けるためである。

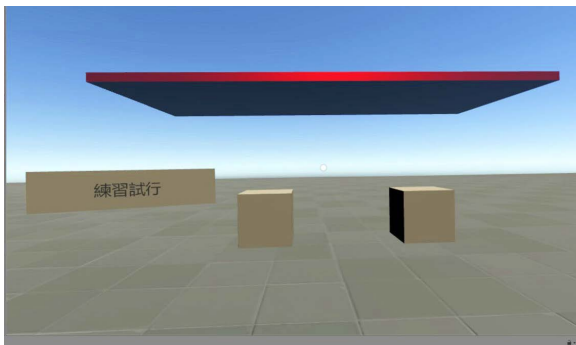


図6 練習試行のVR空間

本試行では、マグニチュード推定法による解析を行うために次のようなタスクを実験参加者に課した。各試行では参加者の前方に二つの見た目が同じで重さの異なる立方体オブジェクトが表示された。左側には標準刺激となる重さが45[%]に固定されたオブジェクトが表示された。右側には、比較刺激となるオブジェクトが表示され、その重さは10, 30, 60, 80[%]の中からランダムで一つが設定された。

参加者にはそれらの二つのオブジェクトを自由に持ち比べさせて、左側のオブジェクトの重さを100とした時に、右側のオブジェクトを主観的にどれくらいの重さに感じたのかを数値で回答させた。比較試行は12回行われ、比較刺激は10, 30, 60, 80[%]の4種の重さがそれぞれ三回ずつランダムに表示された。なお解析では各刺激の三回の回答値の平均値を算出して用いた。本試行で用いたVR空間は練習試行のものとほぼ同様であった(図7)。

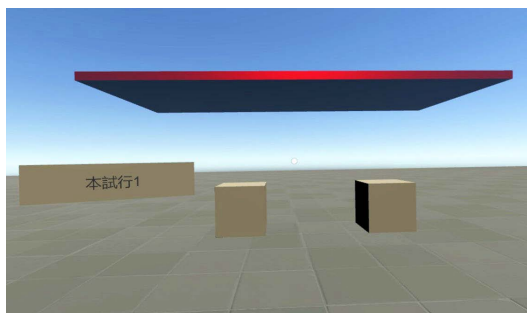


図7 本試行のVR空間

なお、本試行中にヘッドバンドのゆるみ、計測値のずれを感じた際には、参加者に自己申告させ、その都度キャリブレーションを行った後に試行を継続させた。

4.4 結果と考察

本実験の参加者は22名(男性16名,女性6名)であった。一名のみ回答値が大幅に大きかったため外れ値として解析の対象外とした。したがって解析では一名を除いた21名分のデータを対象とした。

マグニチュード推定法の結果として、標準刺激の重さを100とした時の、比較刺激の主観的な重さの数値を集計した。前述の通り三回の試行の平均値が代表値となっている。参加者ごとの結果を折れ線グラフで示したものを図8に、全体を箱ひげ図であらわしたものを図9に示す。

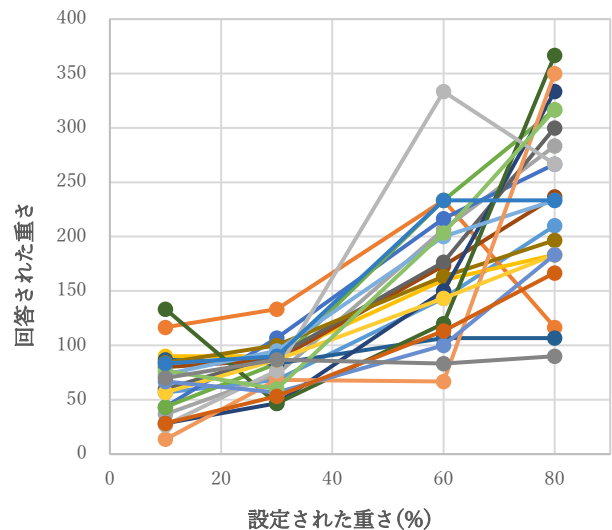


図8 各参加者の回答結果

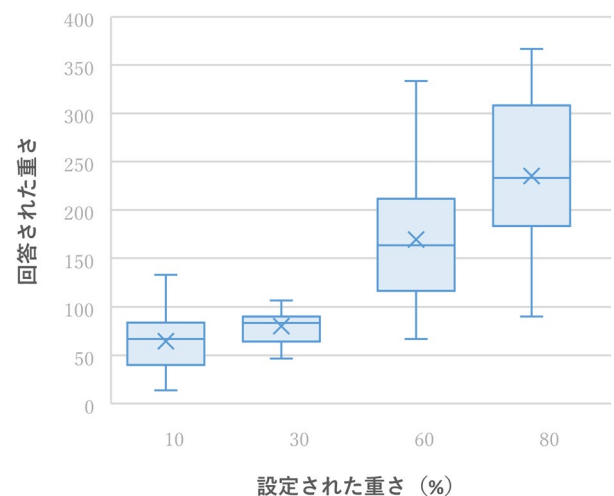


図9 全体の回答結果

また、全参加者のデータに対し、指数近似により引いた近似曲線とその式を図 10 に示す。

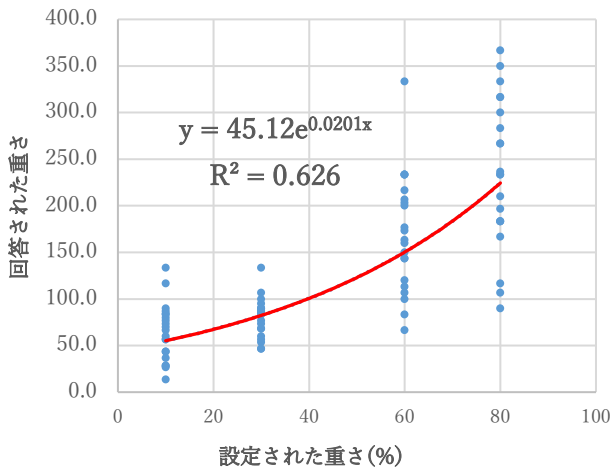


図 10 全データからの近似曲線（指数近似）

各刺激（重さ 10, 30, 60, 80[%]）を要因とする対応ありの一元配置分散分析を行ったところ、 p 値は $p < 0.01$ となった。したがって有意水準 1%で各刺激のデータ群間の差が有意に認められた。

続いて、同じく各刺激（重さ 10%, 30%, 60%, 80%）間に対して、Turkey の方法による多重比較を行った。その結果、10%—30%間を除くすべての組み合わせにおいて 1%水準の q 境界値を上回り、有意であると認められた。表 1 Turkey の方法による多重比較結果に Turkey の方法による多重比較の結果を示す。

表 1 Turkey の方法による多重比較結果

	10	30	60	80
10	-			
30	x	-		
60	<0.01	<0.01	-	
80	<0.01	<0.01	<0.01	-

これらの結果から、以下の考察が得られた。

オブジェクトを持ち上げるのに必要な力が大きいほど、重量感も増加することが示された。ただし、多重比較では 10%と 30%の刺激間に差が認められなかったことから、10-30%, 60%, 80%の強度で重さが弁別できたといえる。インタビューでの意見でも、「軽い、普通、重い」の 3 種類の弁別はできた」という報告があり、大まかな区別として 3 段階ほどの重さの呈示ができたと推測される。

一方で、平均値だけを見ると、45%を 100 の重さとするのに対して、約 1.33 倍である 60%は約 169.5、約 1.78 倍で

ある 80%は約 235.2 と評価された。近似曲線を見ても必要な強さが大きい条件ほどより重く感じられることが示されている。一般には、刺激の強度が大きくなるほど、その感覚量の上昇は鈍くなるというウェーバーの法則などが知られているが、この結果はその法則とは異なった傾向を示している。

その原因として、強さが大きい条件では、食いしぼる力の大きさのほかにも、その力を維持する努力が必要であったことや、疲労や歯の痛みなどがあつたなどの意見もあつたことなどから、別の要因が影響したことが考えられる。即時的な入力ではなく、筋肉の緊張を持続させるようなインタフェースの場合、時間的な要因についても検討が必要出であると考えられた。

疲労についての意見は、インタビューでも報告されたが、約 3 分の 1 の参加者は「疲労はほぼない」と回答し、約 3 分の 1 が「疲労は少しある」、残り 3 分の 1 が「疲労はそれなりにあつた」と、意見が 3 つに分かれた。参加者それぞれの咀嚼筋の強さなどの個人差とも考えられるが、システムとしても、ヘッドバンドの装着の負荷や HMD の装着経験の有無、VR 酔いなどの影響が無いように注意して実験を行う必要があるとも考えられた。

また、少ない力で持ち上がる 10%, 30%の条件では、その差が認められなかったが、ロードセルの信号に含まれるノイズによって、システム上で細かい力の検出および弁別が困難であつたことが可能性として考えられる。さらに、強い力が必要な条件ほど分散も大きくなり、安定して重量感を呈示することが困難であることも示唆された。

この結果は、ロードセルによる食いしぼりに関わる筋出力の検出方法に、まだ改善の余地があることを示唆している。HMD との同時装着もユーザに対する負荷が大きいと考えられ、インタビューでも、首の動きや姿勢によって挙動が変わってしまうとの報告があり、計測や装着方法についての検討がまだまだ必要であるといえる。

インタフェースとしての使用感、操作に関する感想としては、今回の食いしぼりの行動が、物体の把持のみに影響しており、工夫次第でより効果を上げられる可能性があるとの意見が得られた。例えば、物体そのものの見た目や、持ち上げる際の速度や落下時の挙動などによる表現によっても、重量感を想起させるクロスモーダルな錯覚が起こることが先行研究でも示されているので、そうした知見を取り入れることで、インタフェースの高度化が望めると期待された。

5. 結論と課題

本研究では、仮想物体の重量感を呈示する手法として、操作時に重いものを持つときの行動と同じ振る舞いをさせることで、触力覚のフィードバックなしに感覚呈示を行う方法を提案し、食いしぼるという行動を用いたインタフェ

ースを構築し、その手法の有効性の評価と特性についての検討を行った。

実験的検討の結果、食いしばる力の大きさに応じて重量感が想起されるという現象が確認され、提案手法の有効性が示された。一方で、安定した重量感の呈示や、食いしばる力の検出方法などに課題が示された。

最も大きな課題としては、食いしばりの強度を計測する手法の安定性、頑健性の向上が挙げられる。この課題についても、HMD との統合、別の計測機器の利用の検討、ユーザごとの最適化などについて、引き続き検討を進めていく。

今回の実験では、実空間で重いものを持つ際の振る舞いを再現することで、重量の感覚を想起させることを目的として、システムの構築と評価実験を行った。重さ感覚の呈示が可能であることは示されたが、実際のインタフェースとしての実装を想定した場合の検討が必要であるとも考えられた。例えば、今回は物体の把持を食いしばり行動で行い、物体の移動も頭部の運動によって行っていたが、これを従来のコントローラによる操作と組み合わせた実装も考えられ、従来のシステムとの比較などによる評価も行うことで、本提案手法の応用可能性を広げられると期待する。

謝辞 本研究の遂行にあたって、当時早稲田大学表現工学科河合研究室の臼倉拓真氏に多大な協力を得た。ここに記して感謝を示します。

参考文献

- 1) A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard and P. Coiffet.: Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?, Proceedings IEEE Virtual Reality 2000. pp.83-90 (2000)
- 2) 鳴海拓志, 伴 祐樹, 藤井達也, 櫻井 翔, 井村 純, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援(<特集>3次元インタラクション), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 17 巻, 4 号, pp.333-342 (2012)
- 3) 満田 隆: 手首圧迫による擬似力覚の提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 12 巻, 4 号, pp.577-583 (2007)
- 4) 満田 隆, 芳谷博雄: 下腿遠位部圧迫による重量感の提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 18 巻, 3 号, pp.415-420 (2013)
- 5) 平尾悠太郎, 三家礼子, 河合隆史: VR 空間におけるクロスモーダルを用いた重さ感覚提示手法の提案と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 23 巻, 4 号, pp.263-270 (2018)
- 6) 對間祐毅, 伴 祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: Pseudo-haptics を用いた MR 空間内での力作業支援, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 19 巻, 4 号. pp.533-540 (2014)
- 7) Xuhai Xu, Chun Yu, Anind K. Dey, Jennifer Mankoff.: Clench Interface: Novel Biting Input Techniques, CHI '19: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 275, pp.1-12 (2019)
- 8) Gordon Mark Paul, Fan Cao, Russel Torah, Kai Yang, Steve Beeby, and John Tudor: A Smart Textile Based Facial EMG and EOG Computer Interface, IEEE SENSORS JOURNAL, Vol.14, No.2, pp.393-400 (2014)