

HeadMomentController: 頭部へのモーメント制御による力覚提示とその知覚評価

永須 龍太郎¹ 渡邊 恵太²

概要: これまでに VR の分野では、頭部への触覚提示やコントローラの慣性モーメントを制御した手への触覚提示手法が提案されている。この 2 つの手法を参考に、本研究では頭部まわりの力のモーメントを制御する手法を提案し、ヘルメット型力覚提示デバイス HeadMomentController を試作した。さらに、提案手法を用いるうえで提示すべき力のモーメントのパラメータを決定するための知覚実験を行い、モーメント知覚の心理尺度、絶対閾、弁別閾を調査した。実験の結果を踏まえ、提案手法では棒の長さを前後左右に 20cm、提示すべき質量は 200g 以下と結論づけた。

1. はじめに

Head Mounted Display (HMD) は優れた視聴覚ディスプレイであり、Virtual Reality (VR) 体験の質を高めている。多数の VR 研究者は、既存の視聴覚提示に触覚提示を加えることで、VR 体験のさらなる向上を目指している。その触覚提示先として、頭部や手が注目されている。この理由は、VR を体験をするために頭部に HMD を取り付けたりコントローラを手を持つ必要があるため、別の身体部位に新たにデバイスを取り付けることなく、既存の機器を工夫することで触覚提示ができるからである。たとえば頭部への触覚提示の例として、Gugenheimer らは HMD にフライホイールを取り付けてジャイロ効果を生じさせる手法 [1] を、Kon らは HMD にハンガー反射の機構を組み込む手法 [2] を提案している。手への触覚提示の例として、Zenner ら [3] や Fujinawa ら [4] や Shigeyama ら [5] は、VR 体験中に手に持つコントローラの重心（モーメント）を制御して、様々な形や大きさのものを持っているように錯覚させる手法を提案している。

本研究では、頭部への触覚提示とモーメント制御の組み合わせの相性が良いと考えた。なぜなら、頭部は身体の中で地面から最も離れた不安定な部位であるため、小さなモーメントの提示で大きな効果が得られると期待できるからである。そこで、本研究では頭部まわりの力のモーメントを制御する手法を提案する（図 1）。この手法を実現するためにヘルメット型デバイス HeadMomentController (HMC) を試作した。HMC は、ヘルメットに 2 本の棒を水平に直

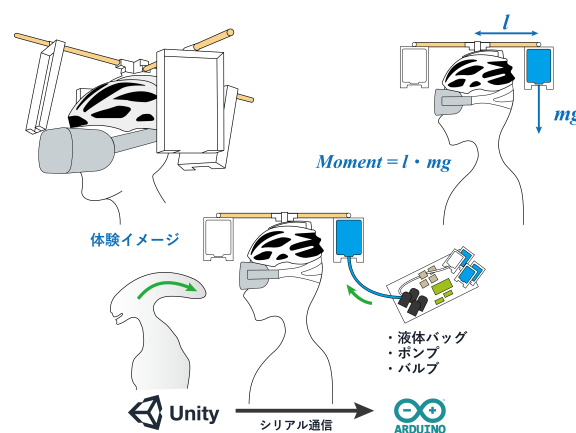


図 1 HMC のアイデアとシステム

行するよう固定し、棒の先端に錘として水の入った点滴バッグを取り付けてある。その点滴バッグにポンプを使用して水を注入/排出することで力のモーメントを制御する。

これまで、手でのモーメント知覚や重量知覚/錯覚についての報告 [6][7] はあるが、頭部のモーメント知覚に関しての報告はない。よって、頭部にどの程度のモーメントを生じさせるべきかについての知見がなく、HMC で頭部に提示すべき力の大きさの目安が分からない。そこで本研究の目的は、提案手法で提示すべき力のモーメントのパラメータを決定することとする。そのために、頭部まわりの力のモーメントの知覚実験を行い、頭部の前後左右それぞれの絶対閾、弁別閾を調査した。絶対閾の結果は図 7、弁別閾の結果は図 8 に示す。実験の結果を踏まえ、提案手法では棒の長さを前後左右に 20cm、提示すべき質量は 200g 以下と結論づけた。さらにこの知覚実験の考察と、HMC の課題、VR アプリケーション例について議論する。

¹ 明治大学 先端数理科学研究科 先端メディアサイエンス専攻

² 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科

2. 関連研究

2.1 頭部への触覚提示

VR 体験中に頭部への触覚提示を行い、VR 体験の向上を目指した研究をあげる。Gugenheimer らは HMD にフライホイールを取り付けることでジャイロ効果を発生させて、VR で空を飛ぶときの空気抵抗を頭部に提示した [1]。Kon らは HMD にハンガー反射を発生させる機構を組み込むことで、VR で頭部を叩かれたときの力覚を提示した [2]。平野らは頭皮にヘッドマッサージャーで多点圧力を提示することで、頭部に植物が生える感覚を体験可能にした [8]。他にも、顔面に圧迫感を提示する手法 [9]、温度を提示する手法 [10]、風を提示する手法 [11] や振動刺激を提示する手法 [12] が提案されている。

VR との組み合わせ以外にも、頭部へのドローンの牽引力提示 [13] や振動刺激の提示 [14] により歩行誘導や方向情報を伝える手法がある。

このように頭部への触覚提示を行う手法の報告は多数あるが、頭部に力のモーメントを提示した報告はない。

2.2 モーメント/重量制御

VR 体験中に手への触覚提示として、モーメント制御を行った研究をあげる。Zenner ら [3] や Fujinawa ら [4] や Shigeyama ら [5] は、VR で使用するコントローラの重心（モーメント）を制御できるデバイスを開発した。彼らは、コントローラ上に動く錘を取り付け、錘を適切な位置に動かし、コントローラの重心を変化させた。これにより、1 つのコントローラで剣やハンマーや盾など、様々なものを持っているかのような VR 表現を可能にした。

次に、VR 体験中に重量を提示する研究をあげる。應和ら [15] はバーチャル生物を捕獲する VR ゲームで、捕獲時に背中中のタンクに水を注入することで捕獲した生物の重量感を提示した。Cheng ら [16] は、腰に取り付けたタンクから手で持つタンクに水を注入することで、VR 中に手に重量感を提示した。Niiyama ら [17] は、ゴム状のタンクに液体金属の注入とプロジェクションマッピングにより、密度/重量変化を提示できるデバイスを提案した。

このように手や背中へのモーメント提示や重量提示を行う手法の報告は多数あるが、頭部に力のモーメントを提示した報告はない。

2.3 モーメント/重量知覚

モーメント/重量知覚の研究はウェーバー、フェヒナーやギブソン以降様々なされているが、それらのほとんどは手での重量感覚に焦点を当てている。Fujinawa ら [4] は実験参加者の視覚を遮断して、ある四角形の物体を手で振ったときにどのような形状だと感じるかを調査し、手での慣



図 2 HMC の実装

性モーメント知覚を機械学習によりモデル化している。南澤ら [6] は、手での重量知覚が固有受容感覚ではなく皮膚感覚のみで起こることを調査し、指先の皮膚変形のみで質量を提示できるデバイスを開発した。

モーメント/重量知覚は、視覚刺激と組み合わせることで錯覚現象が起こるという報告もある。木村ら [7] は、トランク型の物体に Mixed Reality (MR) で縦横の長さを変えた視覚表示をすると、トランクの重心が移動したかのように感じる錯覚現象を報告した。大嶋ら [18] はトランク型の物体に MR で液体が入っているように視覚表示をすると、実際よりもトランクが軽く知覚されることを報告した。

このように、手でのモーメント知覚や重量知覚/錯覚の報告は多数あるが、頭部まわりの力のモーメント知覚に関する報告はない。

3. 試作デバイス HeadMomentController

3.1 システム構成と実装

HMC の構成要素は、ヘルメット・木の棒・3D プリントオブジェクト・点滴バッグ・チューブ・DC 液体ポンプ・電磁バルブである (図 2)。ヘルメット上部に、2 本の棒を水平に直交するように固定している。頭に対して前後左右 4 方向に伸びる棒の先端それぞれには、3D プリントオブジェクトを使用して点滴バッグを固定している。点滴バッグから伸びるチューブは、ポンプ、電磁バルブ、タンクにつながっている。HMC は、頭部に取り付けた点滴バッグにポンプを使用して水を注入/排出することで、頭部のまわりに力のモーメントを提示する。

本研究では、モーメントを動的に制御するために錘として水を用いた。先行研究 [3][4][5] では錘を移動させることでモーメントを制御したが、本研究では錘の位置を固定し、錘自体の質量を変化させる。これにより、力を提示しない方向の錘を 0g にできるので、使用中の HMC の総質量が減り、体験者の負担が緩和する。4 方向すべての水を抜いた状態での HMC の質量は、637g である。ヘルメットは、頭部の周囲とあごひもの長さを調節できる、自転車競技用の軽量なもの (OGK KABUTO FLAIR S/M) を用いた。

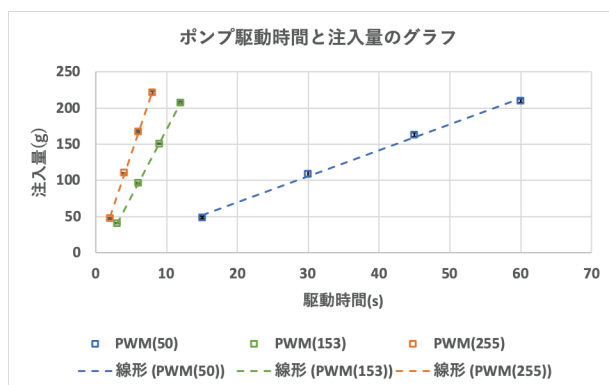


図 3 注入量の測定結果

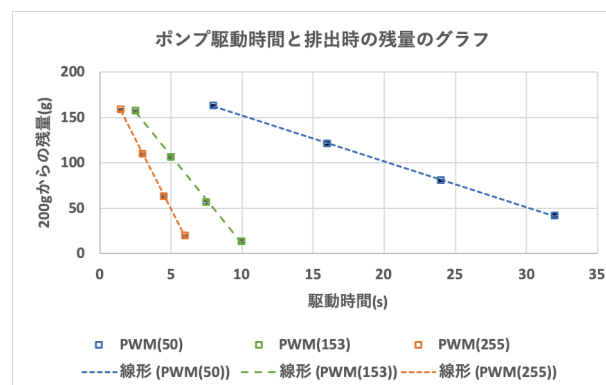


図 4 200g から排出したときの残量の測定結果

DC 液体ポンプ (TOPSFLO TG-02B) と電磁バルブ (Shenzhen Global Technology FPD-270A) の制御には Arduino Mega を用いた。Arduino からモータドライバ (Cytron Technologies MD10C R3.0) に PWM 信号 (50～255) を送ることで、ポンプの注入/排出速度を制御する。また、電磁バルブは水の移動があるときのみ開き、移動が終わるとバルブを閉じて、重力による水の抜け落ちを防ぐ。

棒 (φ 1cm, 長さ 60cm) は前後左右にそれぞれ 30cm 伸びており、点滴バッグの最大容量は 400ml である。このため、HMC が提示可能な力のモーメントの最大値は、 $0.3m \times 0.4kg \times 9.8m/s^2 \simeq 1.18N \cdot m$ である。

3.2 精度評価

試作した HMC が意図した水の量を正確に移動できるかを評価した。HMC の点滴バッグ部分を取り外し、電子天秤に固定した。予備実験から決定した PWM 値 3 種類 (50, 153, 255) に対し、それぞれ駆動時間を 4 種類設定し、そのパラメータで注入/排出したときの質量を 10 回ずつ測定した。注入時は点滴バッグを空にして 0g からの増量を測定した。排出時は点滴バッグに 200g の水を入れた状態から排出を始め、その残量を測定した。

注入時の結果の平均を図 3 に、排出時の結果の平均を図 4 に示す。表 1 は、測定結果の線形近似により駆動時間と移動量の関係を式にしたものであり、小数第二位を四捨五入した。ここから、200g の水を注入するのに約 7.2 秒かかることが分かった。測定結果の各パラメータでの標準偏差を調べたところ、最小で 0.5g, 最大で 3.6g であった。また、測定してから数秒後にはバルブを閉めているにもかかわらず、わずかに水が抜け落ちてしまうことを確認した。

本研究の目的である、提案手法で提示すべき力のモーメントのパラメータを決定するためには、頭部のモーメント知覚を調査する必要がある。水の注入/排出量に多少のずれが生じたり、わずかにチューブに触れるだけで提示されるモーメントが変化してしまうため、現状の HMC のシステムは知覚実験に耐えうる精度ではないと判断した。よって、以降の知覚実験では、分銅でモーメント提示を行う。

表 1 駆動時間と移動量の関係式

(x は駆動時間 (s), y は注入/残量 (g))

PWM 値	関係式 (注入量)	関係式 (残量)
50	$y = 3.6x - 2.0$	$y = -5.1x + 202.5$
153	$y = 18.5x - 14.9$	$y = -19.3x + 203.7$
255	$y = 28.9x - 7.6$	$y = -30.9x + 203.7$

3.3 使用感

椅子に座り HMC を装着した著者 1 名の使用感を述べる。装着する際に、チューブが邪魔になり煩わしさを感じた。点滴バッグが空であれば、重量感はさほどなかった。頭部を動かすとチューブの揺れを感じた。点滴バッグを前後左右それぞれ 20cm の位置に固定し、1 方向ずつ水を注入したところ、200g 程度で十分な力を提示できていると感じた。これを力のモーメントで表すと、 $0.2m \times 0.2kg \times 9.8m/s^2 = 0.392N \cdot m$ となる。特に後方に関しては引っ張られる感覚があり、強い力を感じた。左右については、ヘルメットをしっかり頭部に固定していないと、すぐにずれてしまうことが分かった。PWM (255) で注入/排出すると、水が最初に入ってくる瞬間と最後に抜けていく瞬間に少し振動を感じた。1 方向に 200g の水を入れた状態で頭部を動かすと強い慣性モーメントを感じた。全方向に水を 200g ずつ注入すると、強い重量感があり、少し頭部を動かすだけでふらつくような感覚を得て、強い慣性モーメントを感じた。

4. 知覚実験

4.1 実験 1: モーメント同値での心理尺度評価

4.1.1 実験目的

本手法では頭部に力のモーメントを提示する。力のモーメントは、作用点 (頭部) から力点 (棒上の錘の位置) までの距離と力点で提示する力の大きさ (錘の重量) のベクトル積で決定する。つまり理論上、棒の長さや錘の重量はトレードオフである。しかし、これまで頭部モーメント知覚に関する報告がないため、理論的には同じ力を提示しても人の感じ方が同じかは分からない。そこで、力のモーメントが同値のときの心理尺度を調査する。

4.1.2 実験手順

実験はサーストンの一対比較法 [19] にもとづき行った。提示したパラメータは3種類 (250g, 16cm) (200g, 20cm) (160g, 25cm) で、どれもモーメント値は 0.392N・m である。実験装置として HMC から点滴バッグを取り外し、前後左右に 3D プリントオブジェクトのフックを適切な位置に3つつ取り付けた。実験者は、フックに分銅の入った錘としての 3D プリントオブジェクトを引っ掛けて実験参加者にモーメントを提示する。参加者は、HMC を頭部にしっかりと固定して背もたれのない椅子に姿勢を正して座り、モーメント提示中には正面を向き首を動かさなかった。参加者は、フックを引っ掛けるときの衝撃ではなく、引っ掛けた後の静止状態 2 秒間でのモーメントを比較した。

実験参加者は大学生/大学院生 10 名であり、以下の手順で実験を行った。

- (1) 前後左右の中から 1 方向をランダムに決定する
- (2) 3 種類のパラメータの中から、2 種類をランダムに選出する
- (3) (2) の 2 種類のうち、1 つを参加者に 2 秒間提示する
- (4) (3) で提示しなかったもう一方を、参加者に 2 秒間提示する
- (5) 参加者は 1 回目と 2 回目を比較し、どちらの方がより強い力のモーメントを感じたかを回答する
- (6) 残りの組み合わせについても、(2)~(5) を繰り返す
- (7) 残りの方向についても、(1)~(6) を繰り返す

4.1.3 実験結果と考察

結果を図 5 に示す。図中の数直線は心理尺度を表しており、数値が大きくなるにつれて参加者はより強い力のモーメントを感じていたことを示す。4 方向それぞれについて、カイ二乗検定 [20] を行ったが有意差はなかった。よって、モーメントが同値であれば人間も同じくらいのモーメントだと感じていることが明らかになった。つまり棒の長さや錘の重さは、理論通りのトレードオフであった。本研究では、以降の実験での錘の位置を前後左右それぞれ 20cm とした。これは HMD と点滴バッグがぶつからない十分な距離である。

4.2 実験 2：頭部モーメント知覚の絶対閾

4.2.1 実験目的

本実験の目的は、本手法で提示すべき力のモーメントの最低値を決定することである。つまり、頭部のモーメント知覚の前後左右それぞれについての絶対閾を調査する。絶対閾は、感覚を引き起こすのに必要な最小エネルギーと定義される。

4.2.2 実験手順

実験は PEST 法 [21] にもとづき行った。実験装置として HMC から点滴バッグを取り外し、中心から前後左右に

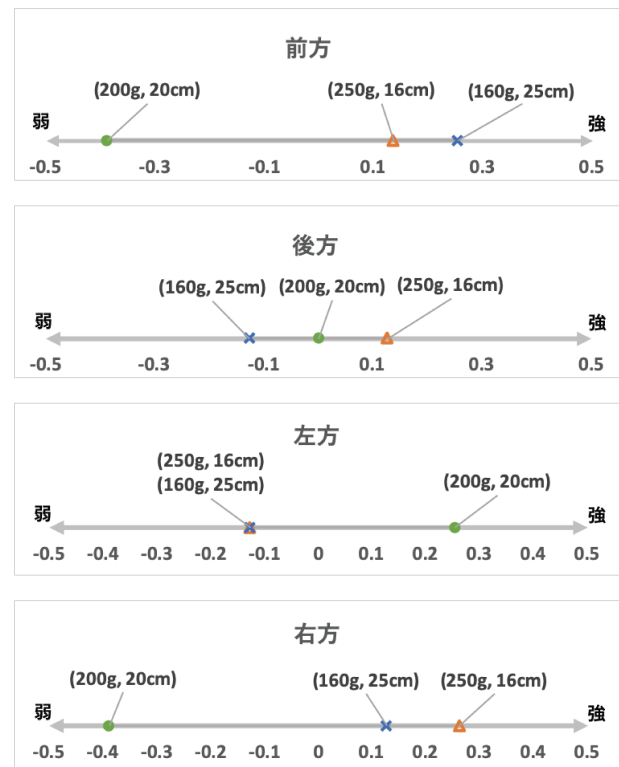


図 5 頭部モーメント知覚の心理尺度



図 6 実験 2, 3 の様子

それぞれ 20cm ずつ離れた位置に箱状の 3D プリントオブジェクトを 4 つ取り付けた。箱の中には、錘を提示する際に音がならないように、ゴムシートを貼り付けた。箱の質量は 61.6g であり、分銅を複数個同時に提示するときは、ビニール袋 (0.57g) に入れひとまとめにした。箱は前後左右に対称に取り付けているので、モーメントは発生しないものとして、測定では箱の質量を無視した。実験参加者は、HMC を頭部にしっかりと固定して背もたれのない椅子に姿勢を正して座り、モーメント提示中には目を閉じて正面を向き首を動かさなかった (図 6)。実験者は、その箱に分銅を置いて参加者に様々なパラメータのモーメントを提示する。PEST ルールにもとづき、初期提示を 50g、ステップサイズの初期値を 50g、最小ステップ値を 1.5g として、提示するパラメータを変えた。錘を置く際は、実験者が一

度箱を手でおさえ、静かに錘を置いた後静かに手を離すことで、置いた衝撃で判断されないよう注意した。

実験参加者は大学生/大学院生 10 名であり、以下の手順で実験を行った。

- (1) 前後左右の中から 1 方向をランダムに決定する
- (2) 分銅で 2 秒間力のモーメントを提示し、参加者は力のモーメントを感じるかを回答する
- (3) 参加者の回答によって、次に提示する分銅の質量を決定する
- (4) ステップ値が 1.5g 未満になるまで (2), (3) を繰り返す
- (5) ステップ値が 1.5g 未満になったら、そのときの値を絶対閾とする
- (6) 残りの方向についても、(1)~(5) を繰り返す

4.2.3 実験結果と考察

結果を図 7 に示す。棒グラフは各方向での 9 名分の絶対閾の平均値 (小数第二位を四捨五入) を表し、エラーバーは標準偏差 (小数第二位を四捨五入) を表す (前: 27.1g, SD=12.8) (後: 19.8g, SD=10.2) (左: 26.4g, SD=29.4) (右: 20.2g, SD=11.9)。実験参加者のうち 1 名は、HMC のヘルメットサイズでは適切に頭部を固定できなかったため、分析から除外した。結果から、前後左右でモーメント知覚が対称ではないと分かる。

実験後に口頭で内観を尋ねられた参加者のほとんどは、後方が知覚しにくいと語った。撮影した映像を見比べると、HMC を装着した時点で、9 名の参加者は後方が下がるように棒が傾いていた。質量を m 、棒と錘のなす角を θ とすると、力のモーメントの大きさは $0.2 \times m \times 9.8 \times \sin\theta$ となるため、 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ の範囲では、 θ が大きいほど提示される力のモーメントは小さくなる。このために参加者は後方を知覚しにくいと感じた可能性がある。しかし、参加者ごとの棒の傾き具合と測定データを見比べると、むしろ棒の傾きが大きいほど絶対閾が小さかった (敏感に知覚していた)。一部の参加者は、後方は引っ張られるような感覚を得たと回答していた。棒が傾いている場合、棒と平行な向きに $mg \cos\theta$ の力が加わることが原因であると考えられる。参加者はこの引っ張られるような感覚を、回答の指標にしていた可能性がある。

左右に関して、映像を確認したが顕著な特徴は観察できなかった。参加者ごとに左右ばらばらに偏りがあり、特に傾向は見つけられなかった。左の標準偏差が高いのは、参加者 1 名の左方の測定結果が 103.57g であったためである。この参加者に関しては後日左方のみ再測定をしたが、74.07g であり他の参加者より明らかに高かった。2 度の測定で約 30g 結果が変わったことや、他の参加者よりも明らかに 1 方向のみの絶対閾が高いことの原因は不明である。この参加者を除いた 8 名での平均値を算出すると、(前: 24.7g, SD=11.6) (後: 19.6g, SD=10.8) (左: 16.8g, SD=11.7)

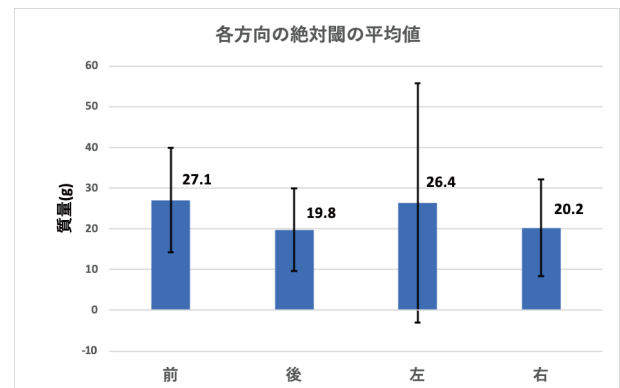


図 7 頭部のモーメント知覚の絶対閾
(錘位置を 20cm に固定したときの提示質量)

(右: 21.8g, SD=11.7) となり、左右で標準偏差に差はなかった。

本実験で得られた絶対閾を水の移動で提示すると、表 1 から PWM 値が 255 で約 1.1 秒 (27.1g の注入) かかる。

4.3 実験 3: 頭部モーメント知覚の弁別閾

4.3.1 実験目的

本実験の目的は、本手法で基準値から変化させるべき力のモーメントの値を決定することである。つまり、頭部のモーメント知覚の絶対閾からの上弁別閾 (UL) と、200g からの下弁別閾 (LL) について調査する。弁別閾は、感覚を引き起こすのに必要な最小エネルギーと定義される。

4.3.2 実験手順

実験は PEST 法 [21] にもとづき行った。実験環境は、実験 2 と同様である。参加者は標準刺激 (各方向の絶対閾 / 200g) と比較刺激の 2 つを順に比較した。なお UL に関しては、最初に各方向の絶対閾のモーメントを提示し、力を知覚できた方向のみ測定した。

UL, LL の実験参加者はともに大学生/大学院生 8 名であり、以下の手順で実験を行った。

- (1) 前後左右の中から 1 方向をランダムに決定する
- (2) 分銅で絶対閾のモーメントを提示し、参加者はモーメントを感じるかを回答する (UL のみ)
- (3) モーメントを感じる場合、測定を開始する (UL のみ)
- (4) 参加者は標準刺激 (2 秒) と比較刺激 (2 秒) を比較して、同じ力だと感じるかを回答する
- (5) 参加者の回答によって、次に提示する比較刺激の分銅の質量を決定する
- (6) ステップ値が 1.5g 未満になるまで (4), (5) を繰り返す
- (7) ステップ値が 1.5g 未満になったら、そのときの値を弁別閾とする
- (8) 残りの方向についても、(1)~(7) を繰り返す

4.3.3 実験結果と考察

結果を図 8 に示す。オレンジの棒グラフは (前: 2 名, 後: 3 名, 左: 5 名, 右: 4 名) 分の UL の平均値 (小数第二位を四

表 2 上/下弁別閾のパーセント表示

方向	上/下 標準刺激	上/下弁別閾
前	28g / 200g	11.6%(3.25g) / 17.2%(34.4g)
後	20g / 200g	99.0%(19.8g) / 22.8%(45.6g)
左	27g / 200g	42.2%(11.4g) / 28.1%(56.3g)
右	21g / 200g	42.9%(9.0g) / 19.8%(39.6g)

捨五入)を表す。青の棒グラフは、(前:7名,後:6名,左:7名,右:7名)分のLLの平均値(小数第二位を四捨五入)を表す。エラーバーは標準偏差(小数第二位を四捨五入)を表す(UL前:3.25g, SD=1.3)(UL後:19.8g, SD=5.1)(UL左:11.4g, SD=11.2)(UL右:9.0g, SD=8.67)・(LL前:34.4g, SD=29.3)(LL後:45.6g, SD=18.9)(LL左:56.3g, SD=11.0)(LL右:39.6g, SD=22.6)。表2は、それぞれの弁別閾をパーセント表示してまとめたものである。LL実験参加者のうち1名は、HMCのヘルメットサイズでは適切に頭部を固定できなかったため、分析から除外した。またLL実験参加者のうち別の1名は、後方の測定で標準刺激と比較刺激が同値であるにもかかわらず、2つは異なる力であると5回連続で回答した。そこで、測定環境になんらかの不具合が生じた可能性があると考え、分析から除外した。

表2から前後のULに大きな差があると分かる。前方は標準刺激から11.6%の増加を知覚できるのに対し、後方は標準刺激から99.0%とほぼ2倍のモーメントを増加させないと知覚できないので、前方は変化に敏感で後方は変化に鈍感であることが分かる。LL実験の前後を比べると、17.2%と22.8%の差がある。しかしLLとULの標準偏差には大きな差がある。LL実験の前後の測定結果の最低値と最高値を比べると、前方が0.93g~75.93g、後方が18.93g~66.93gであった。UL実験は、実験手順(2)で絶対閾を知覚できた比較的モーメント知覚に敏感な方向のみで測定したので、標準偏差が小さくなったと考える。一方でLL実験は比較的モーメント知覚に鈍感な参加者もいた可能性がある。モーメント知覚に敏感な参加者と、鈍感だと思われる参加者の撮影した動画を見比べても、特に顕著な違いはなかった。

表2から左右のULにはほとんど差がないと分かる。一方でLLは、左方がやや高くなっていることが分かる。LL実験の左右の測定結果を確認すると、ある参加者の右方弁別閾が0.93gと非常に小さかった。このため、右方の平均値が下がり標準偏差が高くなったと考える。この参加者と他の参加者の動画を見比べても、特に顕著な違いはなかった。

本実験で得られた弁別閾を水の移動で提示すると、表1からPWM値が255で約0.9秒(19.8gの注入)、約1.9秒(56.3gの排出)かかる。

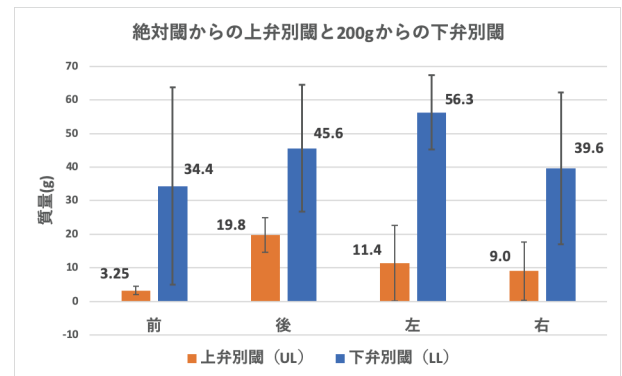


図 8 頭部のモーメント知覚の弁別閾
(錘位置を 20cm に固定したときの提示質量)

5. 議論

5.1 棒の長さで提示する質量

実験1, 2, 3の結果を踏まえて、VRと組み合わせることを想定すると、棒の長さは20cm、提示する錘は1方向につき200gで十分と考える。錘を取り付ける位置が20cmであれば、点滴バッグとHMDがぶつからず、かつ空間的制約も受けにくい。

実験の休憩中に参加者が少し伸びをしたところ、HMCの棒に腕が当たってしまった。よってVRと組み合わせることを想定すると、現在の棒の長さ30cmよりも短くすることが望ましい。また、簡易的に十数名にHMCを装着してもらったところ、ほとんどの体験者は200gで十分な力を感じると内観を語った。HMCで200gの水を注入するには、表1からPWM値が255で約7.2秒かかる。

5.2 知覚実験の改善

4.2.3で述べたように、静止時の棒の傾き具合は頭部モーメント知覚に影響を及ぼすと考えられる。HMCの試作時には、ヘルメットを平らな地面に置き、ジャイロセンサーを用いて棒が水平になるように固定した(誤差1°以内)。ヘルメットを水平にかぶれば棒も水平になるが、頭部の形と首の角度が人それぞれ異なるので、装着状態での水平性を担保できなかった。今後、より厳密な頭部のモーメント知覚を調査する場合には、装着した状態での棒の角度を調節できる機構を組み込む必要がある。

VRと組み合わせると、体験者は頭部を頻繁に動かすことが予想できる。3.3でも述べたが、頭部を動かすと慣性モーメントが生じる。手の知覚では、単なる力のモーメント(手を動かさない)よりも慣性モーメント(手を動かす)の方が力を敏感に感じやすいことが分かっており、頭部に関しても同様であると考えられる。今回の実験2, 3は、頭部を動かさない条件で行ったが、頭部を動かす慣性モーメントの知覚実験を行えば、より小さな絶対閾、弁別閾になると予想できる。

また、実験3は参加者数が不足しているので、今後追加で実験を行う。別の実験として、斜め方向の力のモーメントの知覚実験も考えている。

5.3 知覚不能なモーメントの連続変化

点滴バッグに水を注入後、バルブを開いたままにすると重力によって約45秒かけてすべての水が抜ける。実験者が後方に200gの水を注入し、頭部を動かさない状態で水が抜けていくのを体験したところ、すべての水が抜け落ちた後もモーメントが提示され続けているような感覚を得た。簡易的に十数名にこれを体験してもらったところ、ほとんどの体験者は水が抜け落ちていることに気づかず、すべての水が抜け落ちた後でも、変わらずにモーメントを感じると回答した。ポンプを使用して約6.6秒ですべての水を排出すると、体験者は水が抜けていくのを知覚できると回答した。

つまり、頭部のモーメントを連続的に変化させる場合、変化の速度によってはモーメントを正しく知覚できない可能性がある。この現象が起こる条件や理由については今後調査する必要がある。

5.4 HMCの課題と応用

HMCの課題を述べる。精度に関して、3.2から現在のシステムでは正確に水を移動できないと分かった。これは、実装に用いたポンプとバルブをより高精度なものに変えれば改善する。チューブに関して、頭部から4本垂れ下がっていると、装着時に煩わしさを感じたりVR体験中に手に絡まることが予想できるので、ひとまとめにしてHMCの上を通してタンクに接続するほうが望ましい。提示する質量は200g程度で良いとすると、点滴バッグもより小型にできる。あるいはNiiyamaら[17]のように液体金属を使うことで点滴バッグの体積をさらに小型にできる。小型化するにあたって、プロダクトデザインとして棒と錘部分をHMDと一体化することを目指すべきである。なぜならVR体験中の頭部への触覚提示の利点は、HMDを工夫することで別のデバイスを身体に取り付けなくて済むからである。着脱しやすく、かつ現在のHMDよりもしっかり頭部に固定できる機構も合わせて考える必要がある。

次に、HMCをVRへ応用した場合のアプリケーション例を示す(図9)。たとえば、酔っぱらいVRは、前後左右のバランスが不均一になるようにモーメントを変化させ、酩酊時のふらつき感を提示する。エイリアンVRはエイリアンに変身して後頭部が伸びるアニメーションとともに、後方にモーメントを提示していく。ジェットコースターVRは、カーブに合わせて前後左右にモーメントを提示する。鎧兜VRは、全方向に水を注入することで頭部に何かをかぶったような重量感を提示する。

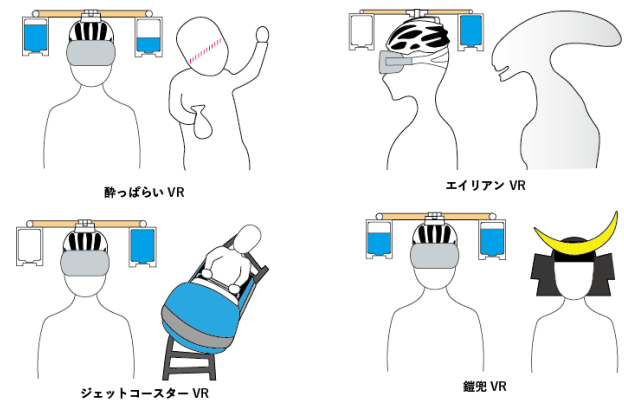


図9 VRアプリケーション例

6. おわりに

本研究では、頭部まわりの力のモーメントを制御する手法を提案し、HMCを試作した。実験ではHMCの精度と、提案手法で頭部に提示すべき力のモーメントの値を決定するためのモーメント知覚について調査した。実験の結果、分銅を利用した頭部のモーメント知覚に関しては、図5、図7、図8の結果を得た。一方でHMCの水の制御は3.2から知覚実験に耐えうるほど正確ではなく、他に水平の条件統制の曖昧さや、実験人数が少ないことには注意が必要である。しかし、頭部への力のモーメント提示という手法には新規性があり、頭部モーメント知覚の大まかな目安や実験方法についての知見を得た。これらの貢献は今後のHMDのプロダクトデザインにも応用できると考える。実験結果や参加者の内観から、提案手法では前後左右に20cm伸びた棒に200g以下の錘を取り付けることが適当であると結論づけた。今後はHMCとHMDの一体化や、VRコンテンツと合わせてVR体験の向上を目指す。

参考文献

- [1] Jan Gugenheimer, Dennis Wolf, Eythor R. Eiriksson, Pattie Maes, and Enrico Rukzio. GyroVR: Simulating Inertia in Virtual Reality Using Head Worn Flywheels. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 227–232, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [2] Yuki Kon, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. HangerOVER: HMD-embedded Haptics Display with Hanger reflex. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17, pp. 11:1–11:2, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [3] A. Zenner and A. Krüger. Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1285–1294, April 2017.
- [4] Eisuke Fujinawa, Shigeo Yoshida, Yuki Koyama, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Computational Design of Hand-held VR Controllers Using Haptic Shape Illusion. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and*

- Technology, VRST '17, pp. 28:1–28:10, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [5] Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Taiju Aoki, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Transcalibur: Weight Moving VR Controller for Dynamic Rendering of 2D Shape Using Haptic Shape Illusion. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '18, pp. 19:1–19:2, New York, NY, USA, 2018. ACM.
 - [6] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 館暲. パーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触覚ディスプレイ (「ハプティックインタラクション」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 15–23, 2008.
 - [7] 木村朝子, 杉田明弘, 面迫宏樹, 柴田史久, 田村秀行. ShapeCOG Illusion:複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象 (「特集」複合現実感 5). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 261–269, 2011.
 - [8] 平野祐也, 竹永正輝, 西川尚志, 丸山寛人, 浅野日登美, 椎名星歩, 千葉麻由, 武田雄太, 渡邊真輝, 橋本直. ブレインツリー: 頭部での植物の成長を表現する触覚インタフェース). エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, Vol. 2019, pp. 6–11, 2019.
 - [9] Hong-Yu Chang, Wen-Jie Tseng, Chia-En Tsai, Hsin-Yu Chen, Roshan Lalintha Peiris, and Liwei Chan. FacePush: Introducing Normal Force on Face with Head-Mounted Displays. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 927–935, New York, NY, USA, 2018. ACM.
 - [10] Roshan Lalintha Peiris, Wei Peng, Zikun Chen, Liwei Chan, and Kouta Minamizawa. ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 5452–5456, New York, NY, USA, 2017. ACM.
 - [11] Nimesha Ranasinghe, Pravar Jain, Shienny Karwita, David Tolley, and Ellen Yi-Luen Do. Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1731–1742, New York, NY, USA, 2017. ACM.
 - [12] 兼古哲也, 棟方渚, 小野哲雄. PerMan: 頭部への刺激を用いた情報提示デバイスのエンタテインメントへの利用. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, Vol. 2015, pp. 173–178, 2015.
 - [13] 高田峻介, 山田渉, 真鍋宏幸, 志築文太郎. ドローンを用いたウェアラブルな歩行牽引デバイスの構築. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2018-HCI-176, pp. 1–6, 2018.
 - [14] 松岡和宏, 鶴田将之, 石井裕剛, 下田宏, 吉川榮和. 頭部への振動刺激を用いた方向情報提示手法に関する実験研究. ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集 (CD-ROM), Vol. 2006, p. ROMBUNNO.1312, 2006.
 - [15] 應和春香, 川嶋賢二, 福嶋昌子, 井村誠孝, 千原國宏, 佐賀野正行, 吉村康弘, 小村仁美, 山崎仁之, 渡邊大輔, 仲野嘉信, 白澤卓, 辻村壮史. INVISIBLE: 影を追う者 (<特集>アートエンタテインメント 2). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 3, pp. 315–324, 2010.
 - [16] Chih-Hao Cheng, Chia-Chi Chang, Ying-Hsuan Chen, Ying-Li Lin, Jing-Yuan Huang, Ping-Hsuan Han, Ju-Chun Ko, and Lai-Chung Lee. GravityCup: A Liquid-based Haptics for Simulating Dynamic Weight in Virtual Reality. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '18, pp. 51:1–51:2, New York, NY, USA, 2018. ACM.
 - [17] Ryuma Niiyama, Lining Yao, and Hiroshi Ishii. Weight and Volume Changing Device with Liquid Metal Transfer. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, pp. 49–52, New York, NY, USA, 2013. ACM.
 - [18] 大嶋佳奈, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子. R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響の測定と考察. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 2, pp. 259–267, 2017.
 - [19] 坂上貴之, 河原純一郎, 木村英司, 三浦佳世, 行場次郎, 石金浩史. 基礎心理学実験法ハンドブック. 朝倉書店, 2018.
 - [20] Frederick Mosteller. Remarks on the method of paired comparisons: III. A test of significance for paired comparisons when equal standard deviations and equal correlations are assumed. *Psychometrika*, Vol. 16, No. 2, pp. 207–218, Jun 1951.
 - [21] 原澤賢充. 適応的心理物理学的測定法による閾値の推定. *VISION*, Vol. 15, No. 3, pp. 189–195, 2003.