

# VRリダイレクションを用いた 座位姿勢改善手法における閾値調査

小林 広夢<sup>†1</sup> 崔 明根<sup>†1</sup> 坂本 大介<sup>†1</sup> 小野 哲雄<sup>†1</sup>

概要：本研究の目的は座位姿勢でVR活動中のユーザに対し、無意識的に姿勢改善を促すことである。そこで本研究ではユーザに知覚されない程度にVR上での前傾姿勢を増幅させ、VR上のオブジェクトに対して適切な距離を保とうとする動機を生じさせることで、ユーザに自発的な姿勢改善をとらせる手法を提案する。前傾運動の増幅はリダイレクション技術における基本操作の一つである「回転量操作」を用いることで、VRにおける前傾運動の増幅ができるのではないかと考えた。一方で、前傾角度の増幅がユーザに知覚されない閾値については調査されてきていないため、本研究では無意識的にユーザに働きかけるための閾値を調査する実験を行った。実験では腰椎と胸椎の2軸を前傾運動時の回転軸に注目して調査した。独立変数は腰椎と胸椎の回転角度に対する増幅倍率の2つを設定し、従属変数は二肢強制選択法に基づいた、回転量操作に対するユーザの正答率である。実験タスクではVR上で前傾運動をユーザに行わせた。結果としては現実環境での上半身の前傾角度に比べて最大で63.7%ほど、ユーザに気づかれない状態でVR上で回転角度を大きくすることが可能であることが示唆された。また胸椎の回転角度増幅よりも腰椎の回転角度増幅のほうが意識的に知覚されにくいことが示唆された。

## 1. はじめに

現在、Virtual Reality (VR) デバイスや情報通信基盤の発展に伴い、VR技術はゲームなどの娯楽から、リハビリテーションなどの産業、福祉の世界にまで幅広く活用されている。VR技術は今後も一層と発展し、人々の暮らしや産業をより豊かなものとすると考えられる。一方で現状の課題として長時間ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着することにより、猫背や過度な前傾姿勢が誘発され、健康上の悪影響を及ぼすことが懸念されている。このことからVR体験中において姿勢改善を促す必要性があると考えられる。

これまでにはVR環境下にかかわらず、姿勢改善を目的とした研究がいくつかなされてきた [1, 2]。これらの姿勢改善研究においては、意識的に働きかけるシステムと無意識的にユーザに働きかけるシステムの2種類が存在する。意識的にユーザに働きかけるシステムはVR上での活動に対する快適性や集中を削ぎ、没入感や作業効率を低下させてしまう恐れがある。そのためVR環境下で無意識的に姿勢改善を促す手法の検討が必要だと言える。

そこで本研究では図1のように座位姿勢の前傾角度を現実環境に比べて気づかれない程度にVR上で増幅させ、無

意識的に姿勢改善を促す手法を提案する。猫背や過度な前傾姿勢など、ユーザが悪い姿勢をとった際に、ユーザが想定していた以上の前傾姿勢をVR上で作り出し投影させることで、ユーザに対して無意識的な不快感を生起させる。その結果としてVR上のオブジェクトに対して適切な距離感を保とうとする動機を生み出し、姿勢改善動作をユーザに自発的に行わせることかできるのではないかと考えた。具体的には、胸椎と腰椎を前傾運動時の回転軸と定義し、それぞれの回転軸に対してリダイレクション技術における基本操作の一つである「回転量操作」を行うことで前傾増幅を実現した。リダイレクション技術とはVR上に投影される映像をユーザの動作と同期させつつ、わずかに現実動作と異なる映像を投影させることで無意識的に行動変容させることが可能となる技術である [3]。このリダイレクション技術を用いるためには、リダイレクションによる介入の程度と、それに対するユーザの知覚の閾値を調査する必要がある。よって本実験では、前傾姿勢時の前傾角度増幅操作がユーザに知覚されない限度となる閾値を調査する実験を行った。実験の結果、ユーザに知覚されずに上半身の前傾角度を最大で63.7%ほど、現実環境と比べてVR上で前傾増幅を実現できる可能性が示された。また胸椎に対する回転量操作に比べて、腰椎に対する回転量操作の方が知覚されにくく、効率よく前傾増幅を実現できることが示

<sup>†1</sup> 北海道大学

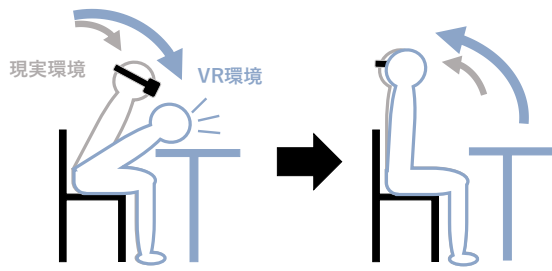


図 1: 提案手法のイメージ. VR 上の前傾角度を現実よりも増幅することで VR 内のオブジェクトと頭部の位置関係が過度なものとなり (左図), 自発的な姿勢改善が生じる (右図)

された.

## 2. 関連研究

### 2.1 姿勢改善研究

ユーザの姿勢改善を目的とした研究はこれまでに VR 環境にかかわらずいくつか行われている. 姿勢改善研究における手法としては大きくユーザに意識的に働きかける手法と, 無意識的に働きかける手法の二つに分けられる. このうち無意識的に働きかける手法はユーザが意識的に姿勢の改善を行う必要がないため, デスクワークなどの作業の集中に悪影響を及ぼさないというメリットを有している. 現実環境で無意識的に姿勢改善を促す例として, ユーザに気づかれない程度の速さでディスプレイを動かすことにより, デスクワーク中のユーザに対し姿勢改善動作を促す研究が挙げられる [2].

また VR 上での作業を想定した研究についても複数行われてきている. VR 上の作業では HMD 自身の重さにより, 姿勢の悪化を招く懸念があることから, VR 上での姿勢改善研究はより重要なものとなると考えられる. また VR での没入感を低減させないように無意識的にユーザに働きかけることも重要な条件であると考えられる. これまでの VR 上での姿勢改善研究の例としては, VR 上でのテキストをユーザに知覚されない程度の速さで移動させ, ユーザの身体や視線方向を無意識的に変化させる研究 [1] などが提案されている. 本研究においてはこれらの研究とは異なり, ユーザの前傾回転を現実環境に比べて VR 上で大きくすることで姿勢改善を無意識に促す手法を提案する.

### 2.2 リダイレクション技術

これまでに VR を用いた研究では, 人間の知覚の限界を利用したリダイレクション技術に関する研究が行われてきた. これはユーザの現実環境での運動方向や運動量を VR 上で気づかれない程度に変容させ, 投影することで疑似感覚を生起させたり, VR 環境での探索性や視認性を向上させることが可能となる技術である [4,5]. 知覚心理学において視覚情報と平衡感覚が一致しない場合, 視覚情報が優位となることが Jürgens らの研究により示唆されている [6].

リダイレクション技術ではこの視覚情報の優位性を利用し, ユーザに対して現実環境とはわずかに異なる VR 映像を気付かれずに提示することで, ユーザを特定の行動に誘導する. リダイレクション技術に関する代表的な研究として Razzaque らによって提案されたリダイレクテッドウォーキング (RDW) が挙げられる [3,7]. RDW とはリダイレクションによって, ユーザが想定した歩行経路とは異なる経路への歩行へと誘導する手法である. Steinicke らはこれらの RDW などのリダイレクション技術の手法について, 「曲率操作」「並進移動量操作」「回転量操作」の大きく 3 つの基本的な操作に分けられると主張している [8].

本研究ではこの基本操作の一つである「回転量操作」を使用する. 回転量操作とは VR 上での回転量を現実環境に比べて増幅, または減衰させる操作である. つまり現実の身体の回転動作よりも VR の回転動作が大きく, もしくは小さくなる. この回転量操作手法では回転ゲインというものを導入することで実現する. 回転ゲインを  $g_r$ , 現実環境での回転量を  $\theta_r$ , VR 上での回転量を  $\theta_v$  とすると以下の式で VR 上での回転量を求め, VR 上で適用する.

$$\theta_v = \theta_r \cdot g_r \quad (1)$$

つまり回転ゲインとは現実環境での回転量を VR 上での回転量に変換する際の倍率を意味する. 回転量を操作することにより, わずかに首を動かすことで VR 上において真後ろの方向を視認可能になるなど, 人体の構造的に不可能な方向を視認することが可能になり, VR 環境上を探索する際に効率性を高めることが可能になる. 先行研究として Bolte らにより, 頭部の回転に対して回転量操作を適用し, ユーザに知覚されない閾値を調査する研究が行われた [7]. 特に立位姿勢に比べて座位姿勢では体の動きをより制限されるため, Wang らの研究のように座位状態での頭部の回転量を増幅させ, VR 環境上での活動の柔軟性を高める研究も行われてきた [9]. 一方で回転量操作を上半身のの前傾姿勢に適用させる研究や相関のある複数の箇所に対してゲインを付加する研究はほとんど行われていない.

## 3. 前傾角度増幅手法

本研究の目的は VR で活動中のユーザに対し, 無意識的に姿勢改善を促すことである. ゆえに本稿ではリダイレクション技術における回転量操作を前傾運動時の前傾回転量に適用させ, VR 上で前傾運動をユーザに気付かれないように増幅させる手法を提案する. これにより, 机などの VR オブジェクトに対して不快な距離感を作り出し, 猫背や過度な前傾姿勢などの悪い姿勢から背筋が伸びた正しい姿勢に自発的に姿勢改善動作を促す.

本手法においては姿勢について, 腰椎と胸椎を前傾運動時の回転軸として定義し, 上半身の姿勢をこれら 2 つの回転軸と頭部-胸椎間ベクトル, 胸椎-腰椎間ベクトルから構

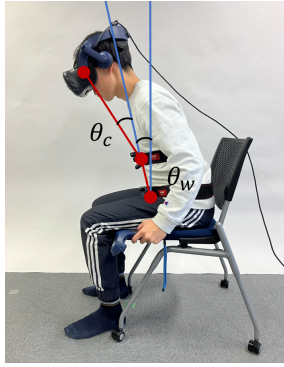


図 2: 姿勢評価の概略図. 上から頭部座標と腰椎回転軸と胸椎回転軸 (赤色点), 腰椎-胸椎間ベクトルと胸椎-頭部間ベクトル (赤色直線),  $\theta_w$  (腰椎回転角度) と  $\theta_c$  (胸椎回転角度)

成するとみなして姿勢を評価した. これは Korakakis らによる最適な座位姿勢を評価する研究において腰椎と胸椎を姿勢評価の基準としていたため [10] であり, 本研究でも腰椎と胸椎を座位姿勢の前傾運動時の基準とした. そして前傾運動時に胸椎軸, 腰椎軸の回転角度に対して回転ゲインを掛けることで現実環境に比べて, VR 上で前傾角度を増幅させる操作を実現した. 図 2 が今回の前傾増幅手法における姿勢評価の概略図である.

以下に 3 次元極座標表示のベクトルを用いて回転量操作時の頭部座標導出方法を示す. 矢状面から見て鉛直方向と胸椎-腰椎を結んだ直線とがなす角度を腰椎回転角度  $\theta_w$  とし, 腰椎-胸椎間ベクトルと胸椎-頭部間ベクトルとがなす角度を胸椎回転角度  $\theta_c$  とした. リアルタイムで頭部, 胸椎, 腰椎の座標を取得し, 現実環境での腰椎-胸椎間ベクトル  $WC_{real} = (r_{wc}, \theta_w, \phi_w)$  と胸椎-頭部間ベクトル  $CH_{real} = (r_{ch}, \theta_c + \theta_w, \phi_c)$  を算出する. その後それぞれのベクトルに腰ゲイン  $g_w$ , 胸ゲイン  $g_c$  を掛けた角度を反映させることで回転量が操作された状態での腰椎-胸椎間ベクトル  $WC_{vr} = (r_{wc}, \theta_w \cdot g_w, \phi_w)$  と胸椎-頭部間ベクトル  $CH_{vr} = (r_{ch}, \theta_c \cdot g_c + \theta_w \cdot g_w, \phi_c)$  を算出する. 最後に以下の式のようにそれぞれのベクトルと腰椎座標  $OW$  を足し合わせることで VR 上での回転量が操作された頭部座標  $OH_{vr}$  を導出した.

$$OH_{vr} = OW + WC_{vr} + CH_{vr} \quad (2)$$

#### 4. 閾値調査実験

本研究では無意識的にユーザに働きかけるため, 前傾運動操作に対するユーザの閾値を調査する実験を行った. 本研究における閾値とは, ある刺激に対してユーザが知覚可能であるための最小限度の刺激の強度を示す値である [11]. これまでに示してきたリダイレクションに関連する研究においては, 回転量, 運動量の操作がユーザに気づかれないことを前提としている. そこで多くの研究ではこの刺激に対する閾値の概念を導入し, 操作がユーザに認識されない

閾値を調査している [3, 7]. 本研究においても先行研究に倣い, 座位姿勢で VR 活動中の実験参加者に対し, 上半身の前傾運動の回転量を操作し, それに対する実験参加者が気づかない閾値を調査した.

#### 4.1 実験参加者と使用機器

本実験では 12 人の実験参加者を用意したが, 1 名について, トラッカーが適切に装着されておらず, 誤ったデータが取得されていたため, 1 名のデータを除き, 全 11 名 (男性 9 名, 女性 2 名, 平均 24 歳, 標準偏差 3.46 歳) のデータを用いて分析を行った. VR の使用経験については全 11 名に VR の使用経験があった. 視力については平均 0.89, 標準偏差が 0.36 となった.

本実験では 4.70GHz の Intel Core i7-12700H のプロセッサと NVIDIA GeForce RTX 3060 のグラフィックアクセラレーターを搭載した PC を用いた. 使用機器については, HMD, コントローラーは HTC VIVE Pro2 を, トラッカーについては VIVE トラッカー (3.0) を用いた. 実験ではソフトウェアは C# で実装した Unity アプリケーションを用いた.

#### 4.2 実験デザイン

実験は参加者内計画として行った. 参加者内の独立変数は 2 つであり, 各独立変数と調査した値は以下のようになっている.

1. 腰ゲイン (腰椎軸の回転量を操作するゲイン)  
(1/2.20, 1/1.80, 1/1.40, 1.00, 1.40, 1.80, 2.20)
2. 胸ゲイン (胸椎軸の回転量を操作するゲイン)  
(1/1.45, 1/1.30, 1/1.15, 1.00, 1.15, 1.30, 1.45)

ゲイン値とは 2.1 節で説明したように現実環境での回転量を VR 上の回転量に変換する際の倍率を意味する. よって腰ゲイン, 胸ゲインとは, 本実験で設定した腰椎軸, 胸椎軸での回転量を VR 上に反映する際の前傾回転量の倍率を意味する. ゲインの値が 1 より大きい場合は前傾角度の増幅を意味し, ゲイン値が 1 より小さい場合は前傾角度の減衰を意味している. そして 1 の時は前傾角度は増幅も減衰もしない. 各独立変数の調査する範囲はパイロットスタディを行い決定した. 各独立変数の 1 以下の値は, 1 以上の値の逆数とした. 本実験の目的は VR 上での前傾増幅がユーザに知覚されない閾値を調査することである. そのため腰ゲイン, 胸ゲインどちらか一方が角度増幅を引き起こし, 他方が減衰を生じさせる組み合わせを調査する必要性が低いと判断したため, 独立変数の組み合わせについては腰ゲイン, 胸ゲインともに 1 以上の全組み合わせと腰ゲイン, 胸ゲインともに 1 以下の全組み合わせを調査した. ゆえに本研究では計 31 種類の独立変数組み合わせを用いた. 本実験で調査した独立変数組み合わせを表 1 に示す.

表 1: 独立変数の組み合わせ (丸が今回検討した独立変数組み合わせ)

		胸ゲイン						
		$\frac{1}{1.45}$	$\frac{1}{1.30}$	$\frac{1}{1.15}$	1	1.15	1.30	1.45
腰ゲイン	$\frac{1}{2.20}$	○	○	○	○			
	$\frac{1}{1.80}$	○	○	○	○			
	$\frac{1}{1.40}$	○	○	○	○			
	1.00	○	○	○	○	○	○	○
	1.40				○	○	○	○
	1.80				○	○	○	○
	2.20				○	○	○	○

独立変数の 31 の組み合わせはランダムな順で提示された。実験参加者はこの 31 組み合わせを 10 回行った。ゆえに実験参加者は 310 回のタスクを行った。また実験参加者は 11 名であるため、合計 3,410 データが収集された。従属変数は後述する二肢強制選択法に従い、「増幅した」と回答した割合である。

#### 4.3 実験手順

実験参加者が実験室に到着後に、まず椅子に座らせ、事前アンケートに答えさせた。その後実験の概要と内容を説明し、胸椎の位置と腰椎の座標を取得するため、胸椎と腰椎に VIVE トラッカーを 2 つ装着させた。その後 HMD を装着し、両手にコントローラを持たせた。次に実験参加者に実験タスクの流れを理解させるため本番タスクのゲイン値を変更した練習用のタスクを行わせた。VR 上の環境は会議室をイメージした。部屋の広さは縦幅 5.0 m、横幅 8.0 m とし、高さは 2.5 m とした。また目の前に縦幅 0.5 m 横幅 4.5 m、高さ 0.6 m の長机を設置した。加えて VR 上で PC の活動をする場面も想定したためウィンドウを設置した。人体工学的に推奨されている、VR 上での最適な読み取り距離を考慮し [12]、前方 1.3 m の方向に横幅 1.6 m、高さ 0.9 m のウィンドウを設置した。ウィンドウにはウェブページの画面を表示させた。

実験タスクは椅子に座った状態で前傾運動を行わせ、前傾運動の回転量が操作された VR 上での視界の動きが現実の動きに比べて「増幅」していたか「減衰」していたか回答するタスクである。「増幅」している状態とは腰椎-頭部間ベクトルと鉛直方向とがなす角度が現実環境に比べて VR 上で大きくなっている状態であり、「減衰」している状態とは現実環境に比べて角度が VR 上で小さくなっている状態である。ゆえにタスク中の VR 上に投影される映像は参加者の動きと同期しつつも、ゲインが付加され前傾運動が操作された視界が投影された。実験タスクの流れはまず正しい姿勢をとらせる。この際、正しい姿勢の基準としては頭部と腰椎を結んだ直線の前傾角度が  $5^\circ$  以下であることとした。次に前傾姿勢をとらせ、現実での前傾角度が  $20^\circ$  に到達すると瞬時に参加者を正しい姿勢に戻させた。現実での前傾角度を  $20^\circ$  とした根拠としては Kayis らによる研究より、複数の座位姿勢の状況での前傾姿勢角度を調査す

る研究より最大前傾角度が  $20^\circ$  であったことから本研究でも  $20^\circ$  を最大前傾角度とした [13]。その後、VR 上で回転量が操作された前傾運動時の回転が現実環境に比べて「増幅」していたか「減衰」していたか回答させた。回答方法としては、左手のコントローラのトリガーを引くと増幅、右手のコントローラのトリガーを引くと減衰として回答するようにした。正しい姿勢をとってから回答までを 1 タスクと定義した。回答後は再び正しい姿勢に戻し、ゲイン値が異なるタスクを繰り返し行わせた。またタスク中は VR 上に指示をテキストとして逐次表示させることで、正しい姿勢や前傾姿勢をとらせるよう促した。

実験参加者は全部で 10 セッション行った。1 セッションは 31 タスクで構成されており、この 31 タスクは独立変数である腰ゲインと胸ゲインの組み合わせ (表 1) である。実験参加者はセッション間に休憩を自由にとることができた。タスク終了後、実験参加者に対しては実験中何か気づいた点があったか自由記述アンケートに回答させた。最後に報酬として 1,000 円分の QUO カードを渡した。実験時間は約 50 分であった。

#### 4.4 評価手法

本実験では二肢強制選択法という心理測定手法を評価に用いた。これはある物理的な刺激に対する人間の感度を定量的に求める際に用いられる。二肢強制選択法ではまず、ある刺激が実験参加者に対して与えられる。その後実験参加者は刺激の程度について事前に用意された 2 パターンの回答のうち一つを選ぶ。そして実験参加者から得られた回答をもとに刺激に対して正しい回答をした正答率を算出する。本実験の場合での刺激の物理量は、VR 上での操作された前傾運動の回転量である。感度については、VR 上で操作された前傾運動に対する感度である。2 パターンの回答については現実環境に比べて前傾運動が「増幅した」か、もしくは「減衰した」の 2 つとした。

また多くの回転量操作による閾値調査研究では二肢強制選択法により刺激に対する正答率を算出したあとに、それらの正答率をもとにロジスティック回帰分析を行う。先行研究ではすべてのものが独立変数を 1 つに設定していたため、S 字カーブ状の 2 次元グラフとして表現可能である [3, 5, 7, 9, 11]。一方で本研究では独立変数を 2 つ設定しているため、これまでの 2 次元ロジスティック回帰分析は不可能であった。そのため本研究では 3 次元ロジスティック回帰を行うこととした。基底関数はシグモイド関数であり、基底関数の数は 3 つとした。反復回数は 100 回であり、ニュートン-ラフソン法による最尤推定を用いた。通常では回帰分析によって得られた S 字回帰曲線をもとに、刺激に対する感度の閾値を求める。一般的には刺激に対する感度の閾値を正答率 75 % 時の刺激の物理量とすることが多



く [3,5,7,9,11], 本実験でも閾値を前傾角度増幅操作時の正答率 75 %時のゲイン値とした。

正答率 75 %のゲイン値を調査する際、本実験では 3 次元ロジスティック回帰分析を用いたため、増幅操作時の正答率 75 %閾値は曲線として表現される。そのため適切な閾値を一意に求めることが不可能であった。この閾値曲線から最適なゲインを調べるため、各実験参加者に対し、意識的に知覚されない前傾運動の最大増幅ゲインを求めた。具体的にはそれぞれの参加者の腰椎-胸椎間距離、胸椎-頭部間距離を考慮し、鉛直方向と頭部-腰椎間ベクトルとがなす角度が最大となる角度を調べた。つまりゲインの付加によって前傾角度（頭部-腰椎が前傾する角度）が最大となるゲインが適切な閾値であるとされた。

ゲインの付加によって増加した角度を最大前傾増幅角度とし、この時のゲイン値を最大増幅ゲインとした。この際、最大増幅ゲインは回帰精度の観点より実験で使用したゲイン組み合わせの区間から選択した。

## 5. 実験結果

本実験は二肢強制選択法での増幅操作時の正答率を 3 次元ロジスティック回帰分析を用いてフィッティングし、増幅操作時の正答率 75 %曲線を導出することで、知覚閾値を求めた。図 3 に回帰分析を行った 3 次元の「増幅」選択確率曲面グラフを示す。また図 4 に二次元グラフ上で増幅操作時の正答率 75 %曲線を示す。

また各実験参加者ごとに、意識的に気づかれない範囲で VR 上での最大前傾増幅角度を実現できる最大増幅ゲインの組み合わせを調査した。1 名は腰ゲイン、胸ゲインの値がそれぞれ 1.58 と 1.22 となりその他の 10 名については 1.96 と 1.00 となった。最大前傾増幅時には現実環境で 20° 前傾時に平均で約 32.75° の前傾を VR 上で実現でき、約 63.7 %ほど、現実環境に比べて VR 上で上半身の前傾角度の増幅を実現できることが示唆された。頭部の座標については最大増幅ゲイン適用時に鉛直方向軸は最小で前後水平方向軸は最大の値となっていった。

また腰ゲイン、胸ゲインそれぞれの前傾角度増幅における寄与量についても調査した。前傾角度増幅操作時の正答率 75 %の場合で腰ゲイン、胸ゲインそれぞれのゲイン値と各軸により増幅された回転角度を全参加者それぞれのデータを用いて調査し、図 5 に示す。

## 6. 考察

本実験の結果より前傾運動の回転量を参加者に気づかれない状態で現実環境での前傾角度 20° から VR 上で約 12.75° 増幅することができ、現実環境に比べて最大約 63.7 %ほど VR 上で上半身の前傾角度を増幅させることが可能であることが示唆された。またこの最大前傾増幅時の頭部

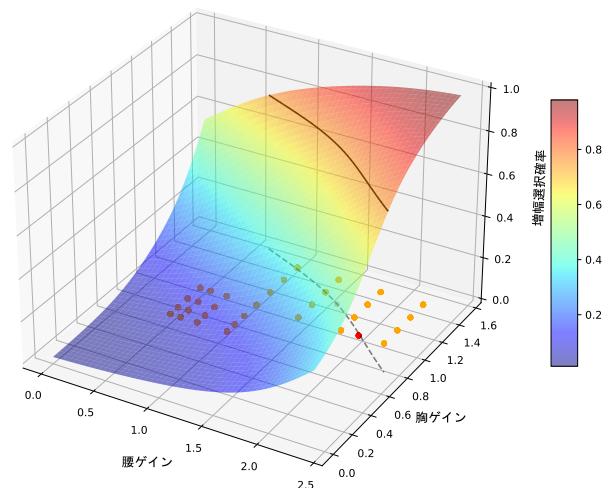


図 3: 増幅回答割合の 3 次元ロジスティック回帰曲面（虹色曲面）。オレンジ色の点は独立変数の組み合わせであり、黒色の曲線は前傾角度増幅操作時の正答率 75 %曲線である

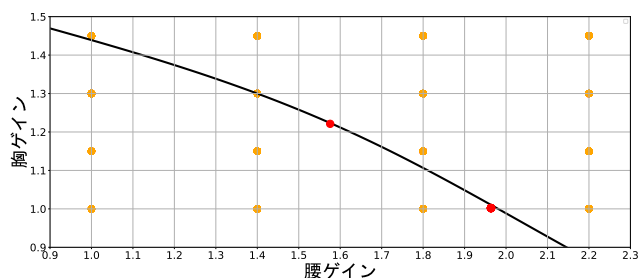


図 4: 前傾角度増幅操作時の正答率 75 %曲線（黒色曲線）。縦軸と横軸がそれぞれ胸ゲインと腰ゲインであり、オレンジ色の点が調査したゲイン組み合わせ、赤色の点がと最大増幅ゲインである

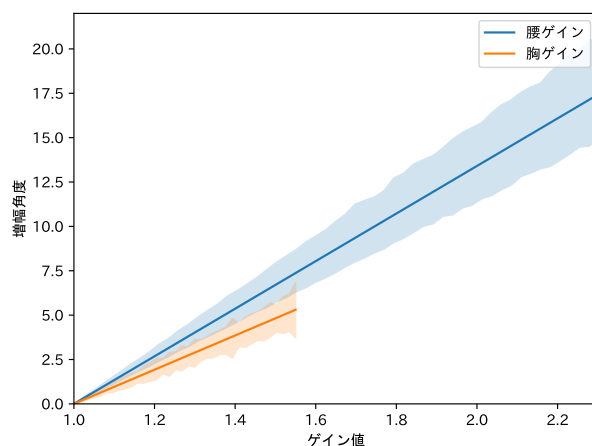


図 5: 各ゲインにおける増幅角度寄与量の線形回帰グラフ（薄色帯区画は 95 %信頼区間）

座標は他のゲインよりも一番低く、前方へのめりの状態を実現した。無意識的に操作することは意識的に知覚される手法に比べユーザの集中や作業効率を阻害しないという利点がある。VR 上の活動には遠くの VR オブジェクトを持ったり、VR 上に表示されたテキストウィンドウを注視

するなど様々な活動が考えられるが、本実験の閾値を用いた上半身の回転量操作手法を用いることにより、現実空間での上半身のわずかな動きで、これらの活動を作業効率を阻害せずに実現することができると思う。

また結果より腰ゲインの値が胸ゲイン値に比べて大きい値でも前傾角度増幅操作時の正答率 75 % を下回っていることから、胸椎軸に比べて腰椎での回転量操作の方がユーザに知覚されにくいことが明らかになった。一方で腰ゲインと胸ゲインの知覚されにくさの程度について比較するには、それぞれの回転軸で増幅された前傾回転角度の寄与量を考慮する必要がある。そこで図 5 を見ると、腰ゲインのグラフの傾きが胸ゲインに比べて大きくなっている。これは無意識的に座位姿勢のユーザの前傾運動の回転量を操作する場合、胸椎を軸とする回転軸より、腰椎を軸とする回転軸の回転量を操作する方が、同じゲイン値でもより大きな前傾角度の増幅を実現できることを示唆している。また一方のゲイン値が 1 の状態で、他方のゲインの閾値を独立的に評価した場合、胸ゲインの閾値は約 1.45 であり、腰ゲインの閾値は約 2.00 であることも考慮すると、腰椎軸の回転量を操作する方が胸椎軸に比べてユーザに知覚されにくいことが示唆される。実際に参加者の最大増幅ゲインの組み合わせの多くが (胸ゲイン, 腰ゲイン) = (1.00, 1.96) となったことについても、腰椎軸の回転量を操作する方が知覚されにくく、かつ効率的に大きな前傾角度増幅を実現できることによるものであると考える。

## 7. まとめ

本研究では座位姿勢での VR 活動において前傾運動を増幅させ、それに対するユーザの知覚閾値を調査した。具体的には姿勢について、前傾運動時の腰椎と胸椎を回転軸とみなし、それぞれの回転軸に対して回転量を操作することで前傾姿勢の増幅を実現し、各回転軸で操作が意識的に知覚されない閾値を調査した。実験の結果から胸椎での回転量操作に比べて腰椎での回転量操作が知覚されにくく、また効率よく前傾増幅を実現することが可能であることが示唆された。また現実環境に比べて上半身の前傾角度を最大で約 63.7 % ほど、VR 上で無意識的に増幅することができた。

## 謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業、JPMJFR226S の支援を受けたものである。

## 参考文献

[1] Shin, J. G., Kim, D., So, C. and Saakes, D.: Body Follows Eye: Unobtrusive Posture Manipulation Through a Dynamic Content Position in Virtual Reality, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors*

*in Computing Systems*, CHI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–14 (online), DOI: 10.1145/3313831.3376794 (2020).

[2] Shin, J.-G., Onchi, E., Reyes, M. J., Song, J., Lee, U., Lee, S.-H. and Saakes, D.: Slow Robots for Unobtrusive Posture Correction, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–10 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300843 (2019).

[3] Razaque, S.: *Redirected walking*, The University of North Carolina at Chapel Hill (2005).

[4] Seo, M. and Kang, H.: Toward virtual stair walking, *The Visual Computer*, Vol. 37, No. 9-11, pp. 2783–2795 (2021).

[5] Matsumoto, K., Langbehn, E., Narumi, T. and Steinicke, F.: Detection thresholds for vertical gains in vr and drone-based telepresence systems, *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE, pp. 101–107 (2020).

[6] Jürgens, R., Boss, T. and Becker, W.: Podokinetic after-rotation does not depend on sensory conflict, *Experimental Brain Research*, Vol. 128, pp. 563–567 (1999).

[7] Bolte, B., Bruder, G., Steinicke, F., Hinrichs, K. and Lappe, M.: Augmentation Techniques for Efficient Exploration in Head-Mounted Display Environments, *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '10, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 11–18 (online), DOI: 10.1145/1889863.1889865 (2010).

[8] Steinicke, F., Bruder, G., Kohli, L., Jerald, J. and Hinrichs, K.: Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback, *2008 International Conference on Cyberworlds*, IEEE, pp. 217–223 (2008).

[9] Wang, C., Zhang, S.-H., Zhang, Y., Zollmann, S. and Hu, S.-M.: On Rotation Gains Within and Beyond Perceptual Limitations for Seated VR, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 7, pp. 3380–3391 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2022.3159799 (2023).

[10] Korakakis, V., O'Sullivan, K., O'Sullivan, P. B., Evagelinou, V., Sotiralis, Y., Sideris, A., Sakellariou, K., Karanasios, S. and Giakas, G.: Physiotherapist perceptions of optimal sitting and standing posture, *Musculoskeletal science and practice*, Vol. 39, pp. 24–31 (2019).

[11] Snodgrass, J., Levy-Berger, G. and Haydon, M.: *Human Experimental Psychology*, Oxford University Press (1985).

[12] Shin, J. G., Kim, D., So, C. and Saakes, D.: Body follows eye: unobtrusive posture manipulation through a dynamic content position in virtual reality, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14 (2020).

[13] Kayis, B. and Hoang, K.: Static three-dimensional modelling of prolonged seated posture, *Applied Ergonomics*, Vol. 30, No. 3, pp. 255–262 (online), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00022-2) (1999).