

座位での物理的な制約の緩和を目指した 知覚されない閾値に基づいたリダイレクション手法の提案と評価

小林 広夢* 鈴木 湧登* 日下部 完* 坂本 大介*

概要. VR空間内では、上半身の回旋を伴うオブジェクトの把持・移動が頻繁に行われるが、座位では背もたれなどの障害物で回旋動作が困難となるなど、物理的な制約が大きい。そこで本研究では、頭部と胸部（上肢）の回旋量をユーザが知覚できない範囲で同時に増幅するリダイレクション手法を提案する。本手法は認知負荷とサイバー酔いを抑制しつつ物理的な回旋量を削減することで、これらの物理的な制約の緩和を目指す。まず提案手法の設計のため、回旋量の増幅がユーザに知覚されない閾値を調査する実験を行い、頭部と胸部の回旋を同時に約1.43倍まで増幅しても、ユーザに知覚されないことが示唆された。この知見に基づき提案手法を実装し、主観的な作業負荷・サイバー酔いの程度と物理的な回旋量削減への影響を評価した。その結果、提案手法は、主観的な作業負荷・酔いの程度に統計的な差は確認されなかったが、これまで困難だった「視認性向上」と「座位における物理的な制約の緩和」を両立できる可能性が示唆された。

1 はじめに

Virtual Reality (VR) はゲームなどのエンターテインメント分野で広く普及し始めている。多くのVRアプリケーションでは、上肢や胸部、頭部を動かし、ユーザを囲むように配置された仮想オブジェクトを把持・移動するといった直接作用するインタラクションが求められる [1, 2]。

しかし障害物（机など）の存在など、利用する環境により仮想オブジェクトとのインタラクションが困難であることがある。特に座位は下半身の動きが妨げられ、加えて背もたれが障害物となり、動きが制限されるため、立位と比較して並進移動や回旋動作が困難となる [3, 4]。並進移動に対しては、上半身の傾きに合わせてVR空間を移動する手法などが提案されてきた [5, 6]。回旋動作に対しては、回旋角度を2倍にして、VR映像として提示させる手法などが提案されている [7, 8, 9]。しかし回旋動作に関する手法は、平衡感覚と視覚情報間で齟齬が生じ、ユーザの認知負荷を高め、サイバー酔いを引き起こす可能性が指摘されている [10, 11]。

そこで、回旋動作における認知負荷とサイバー酔いを抑制しつつ、本来の課題である座位での動きの制限を緩和するため、リダイレクション手法の利用が提案されている [12, 13]。リダイレクションとは、ユーザの物理的な運動方向・量を知覚されない範囲で変容させ、VR映像として提示することで、無自覚に行動変容を促す手法である。これを利用し、頭部の物理的な回旋量と比較して、VR空間内での頭部回旋量を知覚できない程度に増幅することで、VR空間内での周囲の視認性向上を目指した手法である。VR空間での視覚操作がユーザに知覚されず、認知負荷やサイバー酔いを抑制につながる。しかし、このリダイレクションを用いた手法は頭部の回旋のみを増幅対象としており、胸部や上肢は連動しない。そのため、頭部回旋のみの増幅だけでは上肢の物理

的な動作量を削減できずに、上肢と障害物との干渉は依然として大きいままである。

そこで本研究では「上半身回旋時に、背もたれと上肢が干渉すること」と「座面により、下半身の動きが制限され、回旋が困難であること」という2点の物理的な制約の緩和を目指し、頭部と胸部（上肢）の回旋動作に同時にリダイレクションを適用する手法（図1）を新たに検討する。本手法は、ユーザがリダイレクションを知覚できない程度に頭部と胸部（上肢）の仮想的な回旋量を増幅する。これにより、認知負荷とサイバー酔いを抑制しつつ、物理的な回旋量を削減し、背もたれなどによる物理的な制約の緩和を目指す。本研究では、ユーザがリダイレクションを知覚できない程度に頭部と胸部（上肢）の回旋量を増幅する手法を設計し、かつ手法が実際に有用かを確認する。これを設計するためにまず頭部と胸部（上肢）に同時にリダイレクションを適用する際、ユーザに知覚されない回旋増幅の閾値（知覚閾値）はどの程度かを調査する実験を行う。その後、提案手法が主観的な認知負荷とサイバー酔いの増大を抑止しつつ、物理的な回旋量を削減可能かを評価する実験を行う。2つの実験を通して提案手法が座位によるVR空間でのインタラクションにどのように貢献するのかを検討する。

2 関連研究

2.1 VR空間内での可動性向上に向けた研究

座位での活動は下半身が固定され、かつ背もたれが障害物となるため、動作制約が大きい。この制約を緩和し、VR空間内での可動性を向上させるため、様々な研究が行われてきた [5, 6, 7, 8, 9, 12, 13]。例えば、上半身の傾きに合わせてVR空間を移動する手法 [5] や、VR空間内の手を仮想的に伸ばし、遠方のVRオブジェクトとのインタラクションを可能にする手法 [6] が挙げられる。その中でも頭部の運動量や回転量を操作し、VR空間内の視認性を向上させる手法がある [7, 8, 9, 12, 13]。これらの研究では主に Dynamic Rotation Gains と Scrolling と呼ばれ

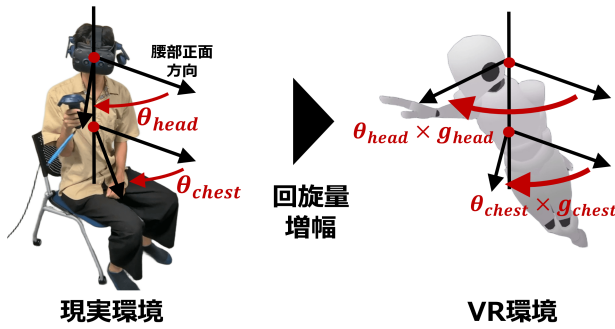


図 1. 上半身のヨー方向回旋量操作の概略図 (上). 現実環境での腰部-胸部間角度 θ_{chest} と腰部-頭部間角度 θ_{head} (左) のそれぞれの角度に胸部回旋ゲイン g_{chest} と、頭部回旋ゲイン g_{head} を乗じて、VR 環境での各回旋角度を操作する (右) .

る 2 つの手法が提案されている [7, 8, 9]. 前者は頭部のヨー方向の回旋量に回旋倍率を乗じ、VR 環境の視界に反映させる手法である. これにより頭部の可動域では視認が困難な後方も視認可能となる. 後者の Scrolling 手法は、頭部の回旋角度が特定の閾値を超えると、同一回旋方向へ視界が自動で回転する手法である. これらの手法は、僅かな頭部の回旋動作でより広範な視野を確認可能にした.

しかし、これらの手法は平衡感覚と視覚情報間の不一致が増大し、ユーザの認知負荷やサイバー酔いが増大することが指摘されている [10, 11]. そこで、認知負荷やサイバー酔いを抑制する手法として、リダイレクション手法の利用が提案されている [12, 13, 14, 15].

2.2 リダイレクション手法

リダイレクションとは、ユーザの物理的な運動方向・量を知覚されない範囲で変容し、VR 映像として提示することで、疑似感覚を生起したり、無自覚な行動変容を促す手法である [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. 代表的な研究では、リダイレクテッドウォーキングが挙げられる [16]. 現実環境で円弧状に歩行するユーザに対し、VR 環境では現実の動きと対応付けられた直進している映像を提示する. これにより直進歩行感覚を生起させる. 視覚と平衡感覚が不一致の場合に視覚が優位となる知覚心理学的特性 [10] を利用し、リダイレクション手法は VR 空間内の体験を現実として知覚させる. Steinicke らはこのリダイレクション手法を、「曲率操作」「並進移動量操作」「回旋量操作」の 3 つの基本操作に分類している [19].

本研究では上半身の仮想的な回旋量を増幅し、物理的な回旋量を削減することで、物理的な制約を緩和するため、基本操作の 1 つである回旋量操作を使用した. 回旋量操作とは、VR 空間内での回旋量を物理的な回旋量に対して増幅または減衰させる操作である. 回旋ゲインと呼ばれる係数を導入することで実現する. 回旋ゲインは物理空間での回旋量を VR 空間の回旋量に変換する際の倍率を意味し、物理的な回旋量に回旋ゲインを乗じ、VR 環境での回旋量として反映させることで回旋量を操作する. 回旋ゲインの値が 1 では現実と VR 環境で回旋量は一致し、

1 より大きい値では回旋量が増幅され、1 より小さい値では減少する. この回旋量操作を人体の各部位の動作に用いることで、例えばわずかに首を動かすことで VR 空間内の後方を視認可能になるなど、可動域などの制約を緩和できる. この回旋量操作は、VR 空間内での視認性向上を目指し後述する頭部の回旋に適用する研究が行われている [12, 13, 14].

2.3 頭部のリダイレクション

頭部のリダイレクションでは、物理的な頭部の回旋角度に対して、回旋ゲインを乗じて増幅した仮想的な回旋時の視界を、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通じてユーザに提示する [12, 13, 14, 15]. これにより VR 空間内での視認性向上を目指す. 基本原理は Dynamic Rotation Gains と同じだが、リダイレクションでは操作がユーザに知覚されない範囲で行われるため、視覚・平衡感覚間の齟齬が小さく、認知負荷やサイバー酔いを低減できる.

しかし、既存のリダイレクション手法は頭部回旋のみに着目している. よって、頭部の回旋増幅に胸部や上肢が連動せず、上肢や手部の物理的な運動量の削減は難しい. そのため、障害物との干渉を十分に緩和できないという課題があった. そこで本研究では、知覚できない範囲で頭部と胸部 (上肢) の回旋量を増幅することで、認知負荷とサイバー酔いを抑制しつつ、物理的な回旋量を削減し、障害物との干渉を低減する手法を検討する.

3 提案手法の検討

本研究では認知負荷とサイバー酔いを抑制しつつ、座位時の物理的な制約を緩和することを目指し、頭部と胸部の回旋量を知覚できない程度に増幅する手法を提案する (3.1 節). この際、回旋増幅がユーザに知覚されない点は認知負荷とサイバー酔いを抑制するための手法設計に重要な要件である. 提案手法の回旋倍率をユーザに知覚されない適切な値にするため、頭部と胸部の回旋量を増幅した際に、ユーザが回旋増幅を知覚しない上限、すなわち知覚閾値を調査する実験も、設計に際して併せて行う (3.2 節).

3.1 「頭部+胸部」回旋動作リダイレクション手法

前提として本研究では、回旋動作について、Nasr らの上半身の身体モデリングを参考に腰部を回旋基準とし、胸部と頭部を独立したヨー方向の回旋軸と定義した [20]. また胸部と上肢の回旋運動は連動するため [21], 上肢の回旋運動は胸部の回旋量と同期させた. 以降に、頭部・胸部・上肢の各回旋動作を増幅する方法を記述する.

胸部の回旋増幅については、腰部回旋角度を回旋角度 0 とし、腰部回旋角度と胸部正面方向がなす角度を胸部回旋角度 θ_{chest} とした. そして、回旋量操作における胸部回旋ゲイン g_{chest} を乗じた $\theta_{chest} \times g_{chest}$ を、VR 空間内の回旋角度として反映させることで、胸部の回旋増幅を実現した (図 1).

頭部の回旋も、腰部回旋角度と頭部正面方向とがなす角度を頭部回旋角度 θ_{head} とし、頭部回旋ゲイン g_{head} を乗じて、VR 空間内の仮想的な回旋角度として反映することで頭部回旋を増幅した (図 1).

上肢の回旋運動の増幅は、胸部と上肢の回旋運動が連動しているため [21]、胸部回転ゲインによる回転量操作が作用する。胸部回旋角度と手部方向とがなす角度を手部回旋角度 θ_{hand} とすると、現実環境における腰部回旋角度と手部回旋角度とがなす角度 $\theta_{hand} + \theta_{chest}$ は、VR 環境では $\theta_{hand} + \theta_{chest} \times g_{chest}$ として反映させることで、上肢に対するリダイレクションを実現した (図 2)。この際、胸部の回旋と同期しない手部の独立的な運動は増幅しなかった。

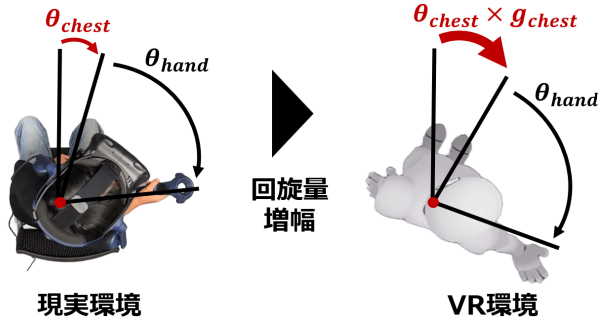


図 2. 上肢のヨー方向回転量操作の概略図。現実環境での腰部—手部間角度 $\theta_{hand} + \theta_{chest}$ (左) に対して、胸部回転ゲイン g_{chest} が作用することで、VR 環境での上肢のヨー方向回転を操作する。(右)

これらの回旋増幅操作は、認知負荷とサイバー酔いを抑制するため、ユーザが知覚しない範囲で行う必要がある。そのため、各回転ゲイン (g_{chest} , g_{head}) の知覚閾値を探索した (3.2 節)。

3.2 知覚閾値調査実験

認知負荷とサイバー酔いを抑制する手法を設計する際に必要となる、ユーザがリダイレクションによる回旋増幅を知覚しない閾値を調査する。

3.2.1 参加者と使用機器

本実験の参加者は 12 名だった (男性 9 名、女性 3 名、平均年齢 22.92 歳、標準偏差 1.75 歳)。実験では、HMD、コントローラーは HTC VIVE Pro2 を、トラッカーは VIVE トラッカー (3.0) を用いた。ソフトウェアは Unity アプリケーションを用いた。

3.2.2 実験デザイン

実験は参加者内計画として設計し、独立変数は以下の 2 つである。

1. 頭部回転ゲイン: (調査した値: 1/1.60, 1/1.40, 1/1.20, 1.00, 1.20, 1.40, 1.60)
2. 胸部回転ゲイン: (調査した値: 1/1.90, 1/1.60, 1/1.30, 1.00, 1.30, 1.60, 1.90)

頭部回転ゲイン、胸部回転ゲインとは、頭部、胸部でのヨー回転量を VR 環境に反映する際の回転量の倍率を意味する。各独立変数の調査する値は予備的に調査して決定した。各ゲインの 1 以下の値は先行研究に倣い [22]、1 以上の値の逆数とした。本実験の目的は VR 環境での上半身の回旋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。そのため頭部回転ゲインと胸部回転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、頭部回

転ゲインと胸部回転ゲインともに 1 以上の全組み合わせと、頭部回転ゲインと胸部回転ゲインともに 1 以下の全組み合わせの計 31 種類の組み合わせを調査した (表 1)。組み合わせの提示順はランダムな順で提示した [12, 13]。31 種類の組み合わせをランダムに並べ替えたタスク群を 1 セッションとし、参加者 1 人当たり 10 セッションの計 310 タスクを行った。

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)

		胸部回転ゲイン						
		1/1.90	1/1.60	1/1.30	1	1.30	1.60	1.90
頭部回転ゲイン	1/1.60	○	○	○	○			
	1/1.40	○	○	○	○			
	1/1.20	○	○	○	○			
	1.00	○	○	○	○	○	○	○
	1.20				○	○	○	○
	1.40				○	○	○	○
	1.60				○	○	○	○

従属変数は、角度増幅と減衰のどちらか一方が提示された際に「ユーザが増幅もしくは減衰を正しく判断できた正答率」である。先行研究に倣い [12, 13]、二肢強制選択法という物理的な刺激に対する人間の感度を定量的に求める手法に沿って従属変数を設定した。二肢強制選択法ではまず、ある物理的な刺激を参加者に提示する。その後、参加者は刺激の程度について事前に用意された 2 つの回答のうち 1 つを選ぶ。そして、刺激に対して正しい回答をした割合を算出する。本研究における提示した物理的な刺激は、回転量操作により物理的な回旋時とは異なった VR 環境の視覚情報である。事前に用意した回答は、VR 空間内での回旋量が物理的な回旋時と比較して「増幅」していたか、「減衰」していたかの 2 択とした。ここで「増幅」とは、物理的な回旋量よりも VR 内での回旋量が大きい状態を指し、「減衰」とは小さい状態を指す。これらのことから従属変数は、増幅もしくは減衰を正しく回答した正答率とした。

3.2.3 実験タスク

参加者は VR 空間内に配置されたオブジェクトに対し、上半身の回旋を伴う把持及び移動を行った。その後、参加者は自身の物理的な回旋量と比較して VR 空間内での視覚的な回旋量が「増幅」していたか「減衰」していたかを回答した。参加者に HMD を通して提示される視界は、物理的な頭部の動きと同期しつつも、各タスクごとにランダム順で設定した倍率で回旋量が増幅または減衰された。椅子は動かないよう固定され、VR 環境は野外風景を採用した [13]。オブジェクトは参加者の目の高さで奥行 0.5m、正面から左右に 90~110 度の範囲にランダムに配置し、直径 14cm の赤色球とした [9, 13]。

タスクの詳細について、まず参加者は座位で正面を向く。次に、VR 空間内の左右に配置した 2 つの赤色球に、それぞれ上半身を回旋させて把持し、正面に移動する。左右 2 つの赤色球を正面の再配置場所に適切に移動すると、直前の回旋動作が「増幅していた」か「減衰していた」かを問う画面が提示される。参加者はこの問いに対してコントローラーを用いて回答する。ここまでの流れが 1 タスクである。

3.2.4 実験手順

参加者は周囲に障害物がない実験室内で椅子に着座したのち、年齢、性別などを尋ねる事前質問票に回答した。次に実験タスク内容を説明し、その後、腰部と胸部にトラッカーを、頭部と手部にHMDとコントローラを装着した。実験機器やタスクへの理解のため、練習タスクを実施した。本番タスクと同じ条件でゲイン値のみを変更し、参加者がタスクを理解したと申告するまで行った。その後、本番タスクを10セッション行った。セッション間には任意で休憩を設けた。実験全体の所要時間は約75分だった。

3.2.5 分析方法

二肢強制選択法で得られた正答率データに対し、3次元のロジスティック回帰分析を行う。基底関数には、物理的な刺激に対する人間の感度はシグモイド性を持つことから[23,24]、シグモイド関数を使用した。基底関数の数はk-分割交差検証(評価指標:負の対数尤度)を行い4つとし、最尤推定を用いた[12,13,14]。その後、分析で得られた回帰曲面から知覚閾値を算出する。知覚閾値は正答率75%時の回転ゲイン値とした[12,13,16]。しかし本研究では、3次元データとなるため正答率75%の閾値は頭部回転ゲインと胸部回転ゲインの組み合わせで構成される曲線として算出される。よって、この曲線上から提案手法に用いる適切な組み合わせを定める必要がある。身体部位の位置や運動に関する自己受容感覚と視覚情報との齟齬は、酔いや認知負荷の増大につながることを示唆されていることから[25]、本研究では頭部と胸部のゲイン値の差に起因する感覚間の齟齬を避けるため、閾値曲線上で頭部回転ゲインと胸部回転ゲインが等しくなる組み合わせを提案手法に用いる閾値として採用した。

3.3 実験結果

図3に3次元の「増幅」選択割合回帰曲面グラフを示す。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。頭部ゲインと胸部ゲインの値が等しくなる閾値曲線上の点は(頭部ゲイン, 胸部ゲイン) = (1.43, 1.43)だった。閾値曲線上で頭部ゲインの値が1の場合、胸部ゲインの値は1.90より大きく、収集したデータ群の外挿をとった。胸部ゲインが1の場合は頭部ゲインは1.46であった。

結果より、認知負荷やサイバー酔いの増大が小さいと考えられる、頭部回転ゲインと胸部回転ゲインがともに1.43となる組み合わせを、提案手法における回転倍率として採用した。

4 評価実験

導出した知覚閾値をもとに設計した提案手法が認知負荷・サイバー酔いの増大を抑制しつつ、頭部・胸部・手部の物理的な動作量を削減し、障害物との干渉の低減に寄与できるか調査する。

4.1 実験参加者と使用機器

本実験の参加者は12名だった(男性9名, 女性3名, 平均年齢22.92歳, 標準偏差1.75歳)。実験機器は3.2節の実験と同じものを使用した。

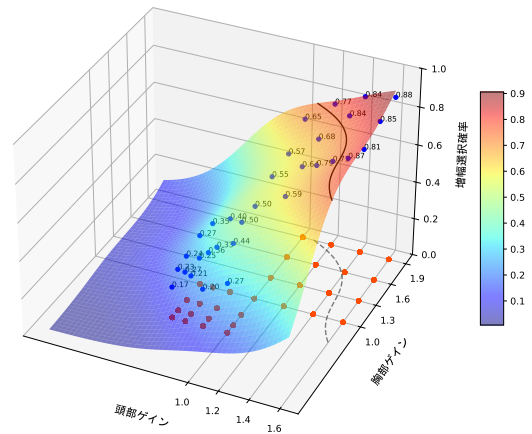


図3. 増幅回答割合の3次元ロジスティック回帰曲面(虹色曲面)。赤色点は独立変数組み合わせ、青色点は各独立条件組み合わせ時の増幅選択割合、黒色曲線は角度増幅操作時の正答率75%曲線である。

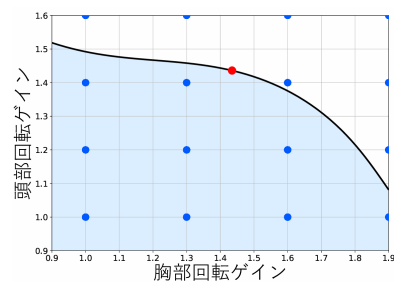


図4. 増幅操作時の正答率75%曲線(黒色曲線)。縦軸と横軸がそれぞれ頭部回転ゲインと胸部回転ゲイン、青色点が調査したゲイン組み合わせ、赤色点が後の評価実験で用いるゲイン組み合わせ、薄い青色の範囲は、正答率75%以下の領域。

4.2 実験デザイン

本実験は参加者内計画として設計し、独立変数は以下の4つを設定した。

1. 頭部+胸部増幅条件: 頭部と胸部の回旋を同時に増幅する。ゲインは3.2節の実験で求めた知覚閾値から、(頭部回転ゲイン, 胸部回転ゲイン) = (1.43, 1.43)とした。
2. 頭部のみ増幅条件: 比較対象となる既存手法として設定した。ゲインは3.2節の実験の結果に基づき、(頭部回転ゲイン, 胸部回転ゲイン) = (1.46, 1.00)とした。
3. 胸部のみ増幅条件: 胸部のリダイレクション適用効果を分離・評価するために設定した。ゲインは3.2節の実験の結果より、(頭部回転ゲイン, 胸部回転ゲイン) = (1.00, 1.90)とした。
4. ベースライン条件: 回旋増幅を一切行わない条件である。

条件の提示順序は学習や疲労の効果を相殺するため、カウンターバランスを用いて参加者ごとに変更した。

評価指標は「動作遂行コスト」「作業負荷」「サイバー酔い」の3点を採用し、各指標に従属変数を設定した。動作遂行コストの従属変数は、頭部・胸部の累積回旋角度、頭部・胸部の回旋範囲、及び手部の累積移動量を設定した。加えて、物理的な動作量が削減できれば、動作の効率化によりタスク速度も

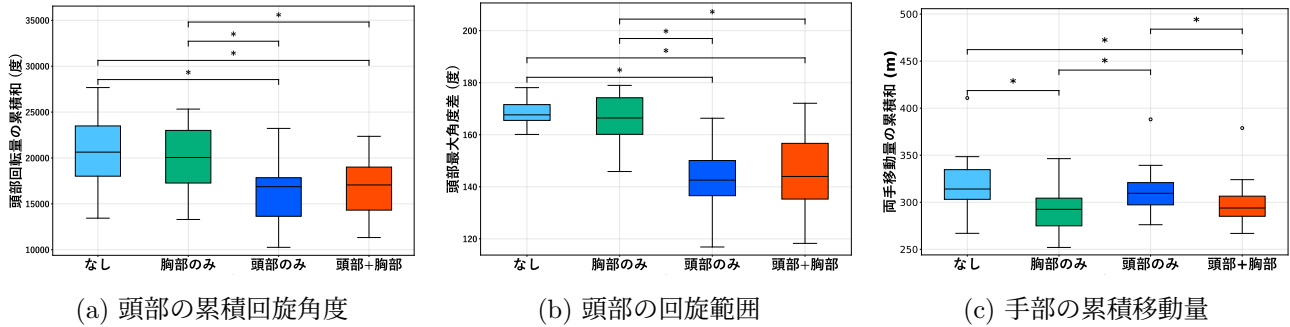


図 5. 頭部の累積回旋角度 (a), 頭部の回旋範囲 (b), 手部の累積移動量 (c) の条件間比較. 水色はベースライン条件, 緑色は胸部のみ増幅条件, 青色は頭部のみ増幅条件, 赤色は頭部+胸部増幅条件を示す.

向上するという仮説の元, タスク完了時間も設定した. 作業負荷は, 認知負荷や身体的負荷などの要素を包括的に含めた指標であり, 認知負荷を測定するために設定した. 従属変数には作業負荷を主観的に測定する NASA-RTLX のスコアを用いた [11]. サイバー酔いの指標には主観的な酔いの程度を測定する SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) を用いた [13].

4.3 実験タスク

実験タスクは 3.2 節の実験のタスクと同様に, Langbehn らの先行研究を参考にし [7, 9, 13], 参加者の VR 空間内の周囲に配置した赤色球を, コントローラを用いて把持し, 正面に再配置するタスクを設定した. まず, VR 空間内の参加者の周囲に, 再配置対象となる赤色球を 1 つ配置する. 赤色球の位置は参加者の頭部座標を中心とする半径 0.5 メートルの円周上, かつ目の高さとした. 正面をヨー方向角度 0 度とし, -110 度, -80 度, -50 度, 0 度, 50 度, 80 度, 110 度の 7 つの離散的な方向からランダムに選択された. 参加者は提示された赤色球をコントローラのトリガー操作で把持し, 正面の半透明の球体で示した地点に移動することが求められた. 正しく再配置されると移動した赤色球は消滅し, 直ちに次の赤色球が前述のいずれかの角度に提示される. 参加者はこの一連の再配置操作を繰り返し行った. 各提示角度ごとに 8 回繰り返し, 合計 56 回 (7 角度 × 8 回) のタスクを 1 セッションとした. 各独立変数に対し 1 セッションずつ, 計 4 セッションを実施した.

4.4 実験手順

参加者は実験室に入室し着席した後, 参加者の年齢や性別などを回答する質問票と主観的な酔いの程度を測る SSQ に回答した. 次に, 参加者はタスク内容や使用機器, 注意事項に関する説明を受けた. この際, 各独立条件の内容は伏せられた. 説明後, 参加者は HMD (頭部), トラッカー (頭部および胸部), コントローラ (両手) を装着し, 着座した状態で実験に臨んだ. 実験は独立条件ごとにセッション単位で実施した. 各セッションの開始前には, 同一条件で 1 分の練習タスクを行った. 練習後, 各セッションを開始した. 各セッションの終了後, 参加者は NASA-RTLX, 及び SSQ に回答した. 回答後は休憩を挟み, 次の条件のセッションへ移行した. この一連の手続きを 4 つの独立条件全てにおいて繰り返した. 実験全体の所要時間は約 70 分だった.

4.5 分析方法

最初に, 全ての従属変数に対してシャピロ・ウィルク検定を行い, 正規性の仮定を満たすか確認した. ただし, NASA-RTLX と SSQ スコアは順序尺度であり, 非正規分布とみなした. 正規性が確認された変数は, パラメトリック検定として繰り返しのある一元配置分散分析を用いた. 球面性の仮定はモークリーの球面性検定で確認した. 分散分析で有意な主効果が見られた場合は, 下位検定にホルム法による補正を行った対応のある t 検定を実施した. 正規性が棄却された変数は, ノンパラメトリック検定に, フリードマン検定を用いた. フリードマン検定で有意差が示された際には, 下位検定としてホルム補正を行ったウィルコクソンの符号順位検定を実施した.

4.6 実験結果

4.6.1 評価指標: 動作遂行コスト

頭部の累積回旋角度, 頭部の回旋範囲, 胸部の累積回旋角度, タスク完了時間で正規性が認められた. その後, 後続の検定にかけた結果, タスク完了時間以外の従属変数で有意差が認められた. 各従属変数の検定結果を以下に記述する.

タスク完了時間を繰り返しのある一元配置分散分析にかけた結果, 有意差は確認されなかった ($F(3, 33) = 0.29, p = 0.83$).

頭部の累積回旋角度を繰り返しのある一元配置分散分析にかけると有意差が認められた ($F(3, 33) = 19.26, p < .05$). 球面性の仮定も満たしたため ($p > .05$), ホルム補正を適用した対応のある t 検定にかけた結果, ベースライン条件-頭部のみ条件間 ($p < .05$), ベースライン条件-頭部+胸部条件間 ($p < .05$), 胸部のみ条件-頭部のみ条件間 ($p < .05$), 胸部のみ条件-頭部+胸部条件間 ($p < .05$) で有意差が認められた (図 5a).

頭部の回旋範囲は繰り返しのある一元配置分散分析の結果, 有意差が認められ ($F(3, 33) = 22.78, p < .05$), 球面性の仮定も満たした ($p > .05$). 対応のある t 検定では, 胸部のみ条件-頭部のみ条件間 ($p < .05$), ベースライン条件-頭部のみ条件間 ($p < .05$), 胸部のみ条件-頭部+胸部条件間 ($p < .05$), ベースライン条件-頭部+胸部条件間 ($p < .05$) で有意差がみられた (図 5b).

胸部の累積回旋角度は, 繰り返しのある一元配置分散分析の結果, 有意差が認められ ($F(3, 33) = 9.60, p < .05$), 球面性の仮定を満たした ($p > .05$).

対応のある t 検定では、ベースライン条件-頭部+胸部条件間 ($p < .05$)、ベースライン条件-頭部のみ条件間 ($p < .05$)、ベースライン条件-胸部のみ条件間 ($p < .05$) で有意差が認められた。

胸部の回旋範囲は、フリードマン検定の結果、有意差が認められた ($\chi^2 = 10.40, p < .05$)。後続のホルム補正を適用したウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、ベースライン条件-頭部のみ条件 ($p < .05$)、ベースライン条件-頭部+胸部条件 ($p < .05$) で有意差が認められた。

手部の累積移動量はフリードマン検定の結果、有意差が認められた ($\chi^2 = 20.10, p < .05$)。その後のウィルコクソンの符号順位検定では、ベースライン条件-胸部のみ条件間 ($p < .05$)、胸部のみ条件-頭部のみ条件間 ($p < .05$)、ベースライン条件-頭部+胸部条件間 ($p < .05$)、頭部のみ条件-頭部+胸部条件間 ($p < .05$) で有意差が認められた (図 5c)。

4.6.2 評価指標：作業負荷・サイバー酔い

NASA-RTLX の各項目でフリードマン検定を行った結果、精神的要求度 ($\chi^2 = 3.57, p > .05$)、身体的要求度 ($\chi^2 = 2.39, p > .05$)、時間的要求度 ($\chi^2 = 0.92, p > .05$)、達成度 ($\chi^2 = 2.77, p > .05$)、努力 ($\chi^2 = 3.34, p > .05$)、フラストレーション ($\chi^2 = 1.65, p > .05$) の全項目で有意差は確認されなかった。

SSQ の各項目にもフリードマン検定を行い、吐き気 ($\chi^2 = 0.61, p > .05$)、眼球運動系 ($\chi^2 = 0.37, p > .05$)、見当識障害 ($\chi^2 = 1.87, p > .05$) の全項目で有意差は確認されなかった。

5 議論

5.1 結果のまとめ

NASA-RTLX スコアを分析した結果、認知負荷を含めた全ての項目で、全条件間に統計的な差は確認されなかった。SSQ スコアも同様に、全条件間で統計的な差は確認されなかった。

一方で動作遂行コストに関する従属変数の分析では多くの有意差が見られた。特に「頭部+胸部増幅」条件は、ベースライン条件と比較してタスク完了時間を除く全ての動作遂行コスト指標で改善が認められた。一方、比較手法である「頭部のみ増幅」条件および「胸部のみ増幅」条件もベースラインと比較して一部の指標を改善したが、手部の移動量または頭部の回旋動作で動作量の削減が見られず、頭部と手部の動作量を同時に削減した「頭部+胸部増幅」条件に比べて動作量の削減効果は限定的だった。

これらのことから、頭部回旋のみを増幅させた既存手法 [12, 13, 14] は、頭部回旋増幅に伴う視認性を向上することは可能であるが、上肢や手部の物理的な動作量を削減し、障害物と上肢間での干渉を低減するのは困難であることが示唆される。一方で、提案手法は、視認性向上と物理的な制約の緩和を同時に実現可能であることが示唆された。

タスク完了時間で改善が見られなかった原因は、タスク全体に占める物理的動作時間に対し、探索などの認知的処理時間の割合が支配的だったためと考

えられる。不確実性の高いタスクでは、認知的処理時間がタスク完了時間の主要因となる可能性が指摘されている [26]。本実験でも、ランダムで出現する仮想オブジェクトを探索する認知的処理がボトルネックとなり、提案手法による物理的動作時間の削減効果が、タスク完了時間の短縮に十分寄与しなかったと考えられる。よって、物理的動作のみならず、認知的処理を考慮した設計も今後調査する必要がある。

また本研究では、平衡感覚・自己受容感覚・視覚情報間での齟齬と、それに伴う認知負荷・サイバー酔いの増大を防ぐため、頭部と胸部の回転ゲインを等しく設定した。しかし、認知負荷・酔いを十分に軽減し、より大きな動作量を削減する非対称なゲイン組み合わせの存在は十分に考えられ、この最適な組み合わせを探索し特定する必要がある。

5.2 応用例

まず1つ目に、エンターテインメント領域での応用が考えられる。VR ゲームなどでは周囲に存在するアイテムを把持して利用するといった際に、頭部や上肢の回旋が求められる [1, 2]。しかし座位では、周辺の障害物により動作が阻害される。そこで本手法を用いることで障害物との干渉を低減し、上肢動作を伴った広い VR 体験の実現に寄与できると考えた。

そして2つ目の応用例として、上肢の機能障害を抱えた患者の機能回復への応用が考えられる。理学療法の分野では、タスクを達成できるという自信 (自己効力感) が訓練効果を高めることが知られている [27]。この知見から、手部の並進移動を増幅し、VR 映像として提示する「ハンドリダイレクション」という手法 [28] の利用が検討されている [18]。これは、上肢の機能障害により本来は困難なタスクを仮想的に実行可能にし、患者の自己効力感と訓練効果の向上を目指す。しかし、ハンドリダイレクション手法は、ほとんどが直線的な手部の運動のみに着目している [18, 28]。そこで、本研究の提案手法を利用することで、頭部・胸部・上肢の回旋動作を伴う、より現実に近い多様な訓練タスクが実現可能となり、訓練環境の多様化に寄与できると考えた。

6 結論

本研究では、認知負荷・サイバー酔いを抑制しつつ、背もたれなどによる物理的制約を緩和する手法として、座位姿勢時の頭部と胸部 (上肢) の回旋動作を、ユーザが知覚できない範囲で同時に増幅するリダイレクション手法を提案した。まず、認知負荷・サイバー酔いを抑制するために、手法の設計に不可欠であった頭部と胸部 (上肢) の回旋増幅時の知覚閾値を調査した。結果、両部位の回旋を同時に 1.43 倍まで増幅しても、ユーザに知覚されないことが示唆された。その後、この閾値を用いて手法を設計し、有効性評価を行った結果、頭部と胸部 (上肢) を同時に増幅する提案手法はベースライン条件と比較して主観的な作業負荷・サイバー酔いに統計的な差は確認されなかったものの、頭部のみ、または胸部のみへ適用する手法と比較して、頭部の視認性向上と回旋動作における物理的な制約の緩和を同時に実現できる可能性が示された。

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] Owlchemy Labs Meta Platforms Inc. meta store, vacation simulator. <https://www.meta.com/ja-jp/experiences/vacation-simulator/2393300320759737/>, 2025. アクセス日: 2025 年 8 月 22 日.
- [2] Valve Corporation. steam ストア, half-life: Alyx. https://store.steampowered.com/app/546560/HalfLife_Alyx/?l=japanese, 2025. アクセス日: 2025 年 8 月 22 日.
- [3] Matthew P Reed, Matthew B Parkinson, and David W Wagner. Torso kinematics in seated reaches. *SAE transactions*, pp. 167–174, 2004.
- [4] Erika Zemková, Michal Jeleň, Ludmila Zapletalová, and Dusan Hamar. Muscle power during standing and seated trunk rotations with different weights. *Sport Mont*, Vol. 15, No. 3, 2017.
- [5] Sam Tregillus, Majed Al Zayer, and Eelke Folmer. Handsfree omnidirectional vr navigation using head tilt. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 4063–4068, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [6] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 79–80, 1996.
- [7] Eike Langbehn, Joel Wittig, Nikolaos Katzakis, and Frank Steinicke. Turn your head half round: Vr rotation techniques for situations with physically limited turning angle. In *Proceedings of Mensch Und Computer 2019*, MuC '19, p. 235–243, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [8] Nahal Norouzi, Luke Bölling, Gerd Bruder, and Greg Welch. Augmented rotations in virtual reality for users with a reduced range of head movement. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, Vol. 6, p. 2055668319841309, 2019.
- [9] Caroline Jay and Roger Hubbard. Amplifying head movements with head-mounted displays. *Presence*, Vol. 12, No. 3, pp. 268–276, 2003.
- [10] R Jürgens, T Boss, and W Becker. Podokinetic after-rotation does not depend on sensory conflict. *Experimental Brain Research*, Vol. 128, pp. 563–567, 1999.
- [11] Tianren Luo, Gaozhang Chen, Yijian Wen, Pengxiang Wang, yachun fan, Teng Han, and Feng Tian. Exploring the effects of sensory conflicts on cognitive fatigue in vr remappings. In *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [12] Benjamin Bolte, Gerd Bruder, Frank Steinicke, Klaus Hinrichs, and Markus Lappe. Augmentation techniques for efficient exploration in head-mounted display environments. In *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '10, p. 11–18, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [13] Chen Wang, Song-Hai Zhang, Yizhuo Zhang, Stefanie Zollmann, and Shi-Min Hu. 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, 2023.
- [14] Jason Jerald, Tabitha Peck, Frank Steinicke, and Mary Whitton. Sensitivity to scene motion for phases of head yaws. In *Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, APGV '08, p. 155–162, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [15] 石川雄大, 崔高超, 井上康之, 田川和義, 唐山英明. Vr 環境におけるピッチ方向のリダイレクション操作に関する検討. 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 29, No. 1, pp. 57–65, 2024.
- [16] Sharif Razzaque. *Redirected walking*. The University of North Carolina at Chapel Hill, 2005.
- [17] 山本達己, 松本啓吾, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝. ヨー方向とロール方向の複合的視点操作によるリダイレクション技術の検討. 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 3, pp. 159–168, 2018.
- [18] 森本浩輔, 渡邊恵太. バーチャルハンドのスケール変化を用いたハンドリダイレクション手法の提案. 日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェア研究会 予稿集, 2024. デモ発表.
- [19] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Luv Kohli, Jason Jerald, and Klaus Hinrichs. Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback. In *2008 International Conference on Cyberworlds*, pp. 217–223. IEEE, 2008.
- [20] Ali Nasr, Arash Hashemi, and John McPhee. Scalable musculoskeletal model for dynamic simulations of upper body movement. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 306–337, 2024.
- [21] W Ben Kibler and Aaron Sciascia. Current concepts: scapular dyskinesis. *British Journal of Sports Medicine*, Vol. 44, No. 5, pp. 300–305, 2010.
- [22] Keigo Matsumoto, Eike Langbehn, Takuji Narumi, and Frank Steinicke. Detection thresholds for vertical gains in vr and drone-based telepresence systems. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 101–107. IEEE, 2020.
- [23] Felix A Wichmann and N Jeremy Hill. The psychometric function: I. fitting, sampling, and goodness of fit. *Perception & psychophysics*, Vol. 63, No. 8, pp. 1293–1313, 2001.
- [24] Nicolaas Prins, et al. *Psychophysics: a practical introduction*. Academic Press, 2016.
- [25] Séamas Weech, Sophie Kenny, and Michael Barnett-Cowan. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: A review. *Frontiers in Psychology*, Vol. Volume 10 - 2019, , 2019.

- [26] Steven C. Seow. Information theoretic models of hci: a comparison of the hick-hyman law and fitts' law. *Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 20, No. 3, p. 315–352, September 2005.
- [27] Rachana Gangwani, Amelia Cain, Amy Collins, and Jessica M. Cassidy. Leveraging factors of self-efficacy and motivation to optimize stroke recovery. *Frontiers in Neurology*, Vol. Volume 13 - 2022, , 2022.
- [28] André Zenner and Antonio Krüger. Estimating detection thresholds for desktop-scale hand redirection in virtual reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 47–55, 2019.

未来ビジョン

リダイレクション手法は、頭部の回転や歩行動作に限らず、階段の昇降やドアの開閉など、多様な状況下における動作への応用が試みられてきた。

しかし既存研究の多くは、身体の一部位の動作や、身体全体を単一的に捉えた動作に焦点を当てている。しかし、実際の人体の動作は、複数の身体部位が協調することで成立しており、複雑かつ多様である。

そこで、本研究では、頭部・胸部・手部といった複数部位に対してリダイレクションを適用することで、より実際の身体動作に近い複雑な動作への拡張を試みた。これは、単一的な身体動作からさらに発展し、より複雑な身体動作における可動性の向上に寄与するものである。

将来的には、本研究をさらに発展させ、より多くの身体部位を考慮したリダイレクションを実現したい。そして、様々な身体動作が求められる VR ゲームなどのエンターテインメント領域から、身体機能に制限を有する者への身体動作の補助など、様々な状況下で柔軟に応用できるリダイレクションを単一の設計で実現できるようにしたい。

また、VR 技術と日常生活が溶け合った、さらに長期的な将来においては、多くの人々の日常生活に、リダイレクション手法が利用されることで、身体機能による制約を超えたより柔軟な身体活動を実現し、かつ身体機能に障害のある者と、健常者との身体機能の差が縮小することで、誰もが自由かつ平等に活動できる世界を実現したい。