

■原著論文■

<Original paper> **Changes in VR Interaction Characteristics Based on Back Recline Angles and Proposed Guidelines**, by Taiki MISHIMA, Kotaro UMEZAWA & Ryoji YOSHITAKE.

背中角度に応じた VR インタラクション特性の変化とガイドライン提案¹

三嶋 泰生², 梅澤 幸太郎², 吉武 良治²

This study aims to clarify the effects of back recline angles (sitting, semi-sitting, and supine positions) on VR interaction characteristics, in response to the growing demand for VR use in reclining positions, such as VR sleep. An experiment was conducted using a Meta Quest 3, in which participants performed a pointing task that required clicking targets arranged distributed omnidirectionally within the virtual environment. Reaction time, head movement, and subjective comfort were evaluated as performance measures. The results revealed that reaction times were significantly delayed in the supine position compared to the sitting position, with a particularly pronounced degradation operability for targets located in the lower visual field. These findings suggest that such performance degradation may be attributed not only to physical range-of-motion constraints caused by contact between the body and the floor but also to functional differences inherent in human visual field regions. Based on these results, this paper discusses the necessity of optimizing user interface layouts and alternative input methods according to posture, and proposed guidelines for VR interface design that accommodate diverse usage positions.

本研究では、VR 睡眠に代表される臥位姿勢での VR 利用需要の拡大を背景に、背中角度の違い（座位・半座位・仰臥位）が VR インタラクション特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。実験では、Meta Quest 3 を用い、全方位に配置されたターゲットをクリックする指向操作タスクを実施し、反応時間、頭部運動、および主観的な快適性を評価した。分析の結果、仰臥位では座位と比較して反応時間が有意に遅延し、特に下方領域のターゲットに対する操作性が著しく低下することが示された。これは、身体と床面の接触による物理的な可動域制限に加え、ヒト特有の視野領域における機能的差異が影響している可能性が示唆された。以上の結果に基づき、姿勢に応じたユーザインターフェイス配置の最適化や代替入力手法の必要性について考察し、多様な利用姿勢を想定した VR インターフェイス設計のためのガイドラインを提案した。

（キーワード： バーチャルリアリティ（VR）、インタラクション特性、背中角度、臥位姿勢、指向操作、アクセシビリティ）

1 1. はじめに

近年、VR 技術の普及により従来の立位・座位を超えた多様な利用場面が出現している。特にソーシャル VR プラットフォームの代表例である VRChat¹⁾では、「VR 睡眠」と呼ばれる現象も確認され、臥位での VR 利用が行われている。Meta 社の「寝そべりモード」が実装されるなど、仰臥位姿勢で VR を行う需要は拡大している。このような背景から、体力的な負担から起き上がりを避けたい高齢者や障害者などが、座位や立位にとらわれず臥位姿勢においても VR を通して人と

11 コミュニケーションできる環境の実現が期待される。
12 しかし、既存研究では主に立位・座位での評価が中心
13 であり、臥位での研究は限られたものである。van Gemert et
14 al.による研究²⁾は存在するが、これは仰臥位による主
15 観評価が中心であり、定量的なインタラクション特性
16 は示されていない。さらに、ISO 9241-820:2024「拡張
17 現実や仮想現実を含む没入型環境におけるインタラ
18 クションに関する人間工学ガイドライン」³⁾においても、
19 座位や立位での利用を標準的な前提としており、体位
20 別の操作に関する明確なガイドラインは見あたらな
21 い。
22
23 本研究の目的は、背中角度の違い（座位・半座位・仰

1 受付：****年*月**日 受理：****年**月**日

2 芝浦工業大学
Shibaura Institute of Technology

1 臥位)が VR 空間における指向操作特性に与える影響
 2 を定量的に明らかにすることである.具体的には,VR
 3 空間に配置されたターゲットに対するクリックタ
 4 スクを通じ,反応時間や頭部移動量,および主観的評価
 5 を分析する.これらの検証を通じて,仰臥位姿勢における VR インターフェイス設計や利用のためのガイド
 6 ラインを導出することを目指す.
 7

9 2. 実験 1 : 背中角度の違いによる VR インタラ 10 クション特性の比較

11 2-1. 目的と方法

12 背中角度の違いが操作反応時間や誤操作, 頭部運動,
 13 および VR 酔いに与える影響を明らかにするため, 本
 14 実験では座位, 半座位, 仰臥位の 3 条件を比較検討し
 15 た. これらの条件を選定した理由は, 垂直な座位から
 16 水平な仰臥位に至るまでの姿勢の連続的な変化が, イ
 17 ンタラクション特性に与える影響を段階的に評価す
 18 るためである. 座位, 半座位, 仰臥位の 3 つの体位条件
 19 を図 1 に示す.



46 図 1 体位条件

20 Fig.1 Experimental Condition in body position

21 本実験の主な実験条件を表 1 に示す. 実験参加者は
 22 大学生 12 名とした. 実施タスクは, Unity で構築した
 23 球体ターゲットをクリックするタスクを用いた. Meta
 24 Quest3 のゴーグルを装着し, ターゲットを発見したら
 25 できるだけ早く右手コントローラのトリガーボタン
 26 を押すように指示した. ターゲットは空間内の 9 位置
 27 に配置し, 各位置 4~6 回ずつランダムに提示する構
 28 成とした. ターゲット配置の概略を図 2 に示す. 実験
 29 条件である 3 種類の体位 (座位, 半座位, 仰臥位) の実
 30 施順序は, 全参加者においてこの順で固定して実施し
 31 た. 順序を固定することによる学習効果の影響を最小
 32 限に抑えるため, 本試行を開始する前に, 実験参加者
 33 が操作に十分に慣れたと自己申告するまで本試行と
 34 同様の条件で練習試行を実施した.

35 評価指標として, 反応時間, 成功率, ミスクリック回

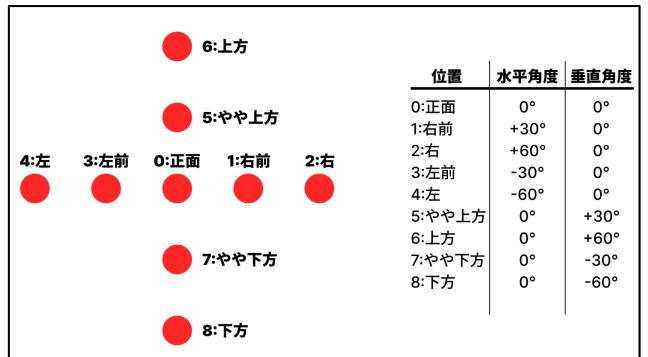
37 数に加え, 右手コントローラの軌跡データを取得し,
 38 軌跡長を算出した. また, VR 酔いの評価には CSQ-VR⁴⁾
 39 に基づく 7 段階リッカート尺度の 6 項目を用い, 各体
 40 位条件におけるスコアを測定した. さらに, 全実験終
 41 了後に半構造化インタビューを実施した. なお, 本実
 42 験の条件設定は ISO 9241-411⁵⁾ の 2D タスクを参考に
 43 した.

44 表 1 実験条件

45 Table 1 Experimental Condition

区分	項目	内容
参加者	人数	12名
	年齢	20~22歳
実験仕様	制限時間	各ターゲット 5 s
	ターゲットサイズ	視角 1.5°
	ターゲット距離	仮想空間内 1.5m 固定
実験環境	実施場所	静かな実験室
	体位保持具	オフィスチェア, キャンプ用マット, 枕
取得指標	反応時間	ターゲットクリックまでの時間(s)
	失敗回数	ターゲットクリックに失敗した回数
	頭部移動量	頭部移動の総距離(m)
	右手コントローラの総軌跡長	ターゲットクリックまでの右手コントローラの移動距離 (mm)
	VR 酔いスコア	CSQ-VR を基礎とした 6 項目の自己申告評価 (7 段階リッカート尺度)

46



47 図 2 ターゲットの配置

48 Fig.2 Target layout

49 本実験の実施にあたっては, 研究倫理に十分配慮し
 50 た. 実験開始前に, すべての参加者に対して研究の目的
 51 的, 手法, データの取り扱い (個人情報の保護および
 52 学術利用の限定) について詳細な説明を行い, 書面にて同意を得た. その際, VR 酔いによる身体的負荷の可

1 能性について特に注意を促すとともに、体調に異変を感じた場合やその他の理由により継続が困難と判断した場合には、いつでもペナルティなく実験を中断・辞退できる権利があることを明示した。また、実験中は常に実験者が参加者の状態を監視し、異常が認められた場合には即座に実験を中止する体制を整えた。

7 8 2-2. 結果

9 体位条件ごとの反応時間の平均と標準偏差を図3
10 に示す。反応時間は座位が最も短く(0.85 s), 半座位
11 (0.96 s), 仰臥位(1.02 s)の順に延長しており、背
12 中角度の減少に伴ってパフォーマンスが低下する傾
13 向が確認された。失敗回数は座位で0.042回、半座位
14 で0.069回、仰臥位で0.156回となり、誤操作も仰臥
15 位で最も増加していた。

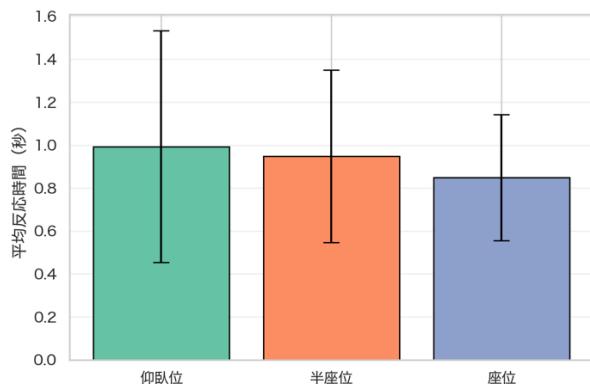


図3 体位条件ごとの反応時間

Fig.3 Reaction Times across Different Posture

16 反応時間の正規性が満たされなかつたため、Kruskal-Wallis検定を適用したところ有意な主効果が得られた($H = 16.30, p = 0.0003$)。さらに対応のあるt検定により、座位と仰臥位の間には有意差が認められ($t = 2.66, p = 0.032$)、仰臥位ではクリック操作が有意に遅延していた。

つぎに、体位条件別の角度別平均反応時間を比較する。分析にはKruskal-Wallis検定を用い、事後検定としてBonferroni補正を伴うMann-WhitneyのU検定およびWelchのt検定を併用した。図4、図5、図6に座位、半座位、仰臥位における角度別平均反応時間を示す。座位においては、水平方向および垂直方向のいずれにおいても有意な反応時間の差が認められた。水平方向においては、正面(0.70 s)が最も速く、左右に離れるに従って反応時間は遅延する傾向を示した。垂直

34 方向においても、正面が最も速く、上方向では30°
35 (0.79 s)に比べ60°(1.10 s)で顕著な遅延が認められた。垂直方向においても正面から上下に離れるほど反応時間が有意に長くなる傾向が確認された。半座位においては、水平方向および垂直方向のいずれにおいても有意な反応時間の差が認められた。水平方向においては、正面(0.76 s)が最も速く、左右に離れるに従って反応時間は遅延する傾向を示した。垂直方向においても、正面が最も速く、上方向では30°(0.77 s)に比べ60°(1.09 s)で大幅な遅延が認められた。

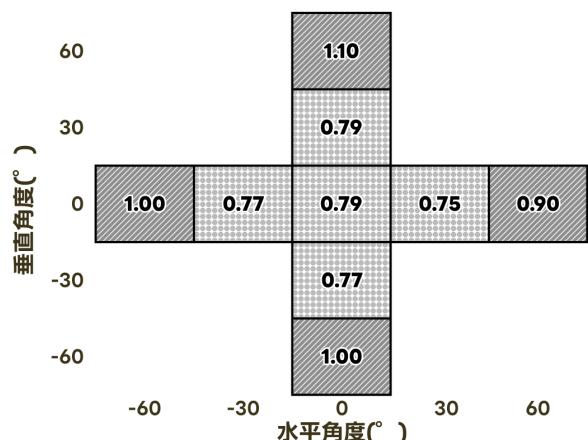


図4 座位における角度別平均反応時間

Fig.4 Average reaction times for different angles (Sitting)

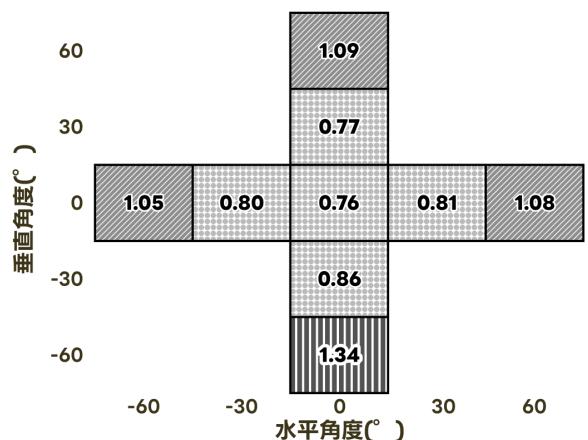


図5 半座位における角度別平均反応時間

Fig.5 Average reaction times for different angles (Semi sitting)

仰臥位においては、水平方向および垂直方向のいずれにおいても有意な反応時間の差が認められた。水平方向においては、正面(0.75 s)が最も速く、左右に離れるに従って反応時間は遅延する傾向を示した。垂直

1 方向においても、正面が最も速く、上方向では 30°
 2 (0.74 s) に比べ 60° (1.02 s) で顕著な遅延が認められた。また、下方向においては 60° (1.69 s) で反応時間が極めて有意に長くなっている。垂直方向の周辺部において他の姿勢よりも大幅な反応遅延が生じる傾向が確認された。

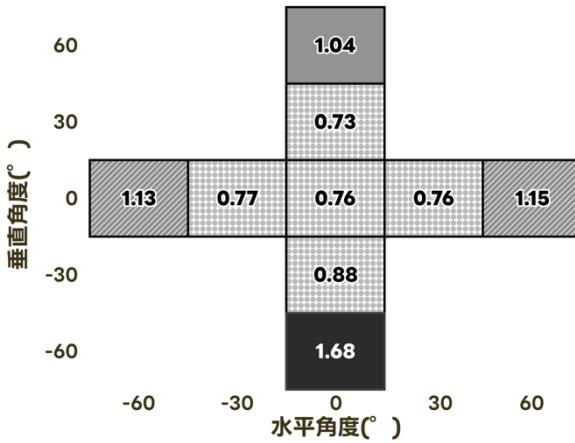


図 6 仰臥位における角度別平均反応時間

Fig.6 Average reaction times for different angles
(Supine)

一方で実験終了後のインタビューでは、「上の方が最もクリックが難しかった」と複数人が回答しており、定量データと主観データの乖離が確認された。体位条件ごとの頭部移動量を比較した結果、平均値は半座位で最も大きく (2.835 m)、次いで座位 (2.364 m)、仰臥位 (2.204 m) の順となった。中央値においても、半座位 (3.097 m) が最も高い値を示し、仰臥位 (2.182 m) や座位 (2.337 m) を上回る結果となった。各体位間の差について Kruskal-Wallis 検定を行った結果、統計的な有意差は認められなかった ($H = 3.6772, p = 0.1590$)。

主観的な VR 醉いの評価には、CSQ-VR を用いた。CSQ-VR は、VR 環境における酔い (VRSE) を評価するため Kourtesis らによって開発された指標であり、吐き気 (Nausea)、前庭感覚 (Vestibular)、眼球運動 (Oculomotor) の 3 カテゴリー、計 6 項目で構成されている。各項目は「1:Absent (なし)」から「7:Extreme (極限)」までの 7 段階のリッカート尺度で回答を求めるものである。スコアの算出にあたっては、各項目の合計値を「VR 醉いスコア」とした。この算出方法により、VR 醉いスコアの理論上の最小値は 6、最大値は 42 となる。本研究における体位条件ごとの VR 醉いス

コアの比較結果を図 7 に示す。VR 醉いスコアの平均は、座位が 12.92、半座位が 15.0、仰臥位が 17.17 であった。平均値の推移を見ると、背中角度が小さくなり体幹が寝た状態に近づくほど VR 醉いスコアが増加する傾向がみられた。しかし、一元配置分散分析の結果、VR 醉いスコアに統計的な有意差は認められなかった ($F(2, 33) = 0.71, p = 0.498$)。ただし、本実験では座位、半座位、仰臥位の順で条件を固定して実施したため、この平均値の推移には実験の進行に伴う VR 醉いの蓄積が反映されている可能性がある。以上のことから、本実験の条件下においては、背中角度の変動が主観的な VR 醉いの強さに及ぼす影響は、統計的に明確なものとは言えないことが示唆された。サンプルサイズの拡大、VR コンテンツの曝露時間の調整、提示順序のカウンターバランス検討などにより、結果が異なる可能性もある。

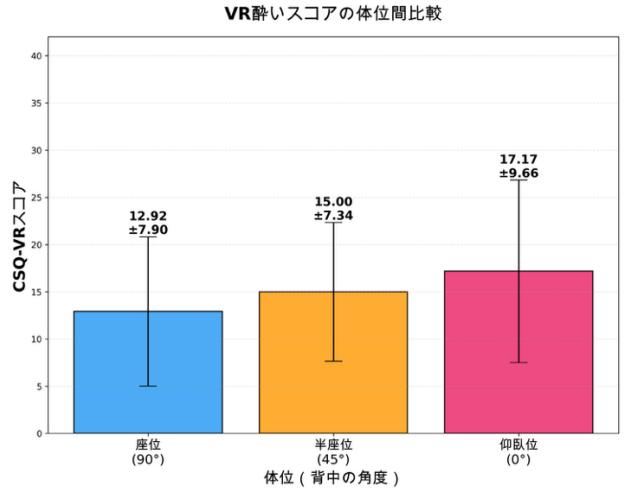


図 7 体位条件別の VR 醉いスコアの比較

Fig.7 VR sickness scores by posture condition

右手コントローラの操作特性を定量化するために、以下の指標を算出した。各サンプルの位置 p_i を、タイムスタンプを t_i とすると、各サンプル間の速度 v_i は式 (1) で定義される。

$$v_i = \frac{|p_i - p_{i-1}|}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

これに基づき、全サンプルの平均速度 ($Mean\ Velocity = mean(v_i)$) を求めた。また、動作の滑らかさ指標 (Smoothness) は速度の変動係数として定義し、式 (2) を用いて算出した。

$$Smoothness = \frac{std(v_i)}{mean(v_i)} \quad (2)$$

なお、本指標は値が小さいほど動作が滑らかである

1 ことを示す。さらに、速度列の勾配から加速度 a_i 、およ
2 びジャク j_i を順次求め、その平均値(Mean Jerk)を
3 算出した。右手コントローラの総軌跡長の平均は、座
4 位が 21.06 mm、半座位が 21.00 mm 前後、仰臥位が
5 22.66 mm 程度であり、仰臥位でやや長い傾向はあつ
6 たものの、大きな差ではなかった。平均曲率、滑らかさ
7 指標、平均ジャークについても同様であり、いずれの
8 指標も体位条件による大きな違いはみられなかつた。
9 一元配置分散分析の結果、総軌跡長 ($F = 0.17$, $p =$
10 0.842), 平均曲率 ($F = 1.32$, $p = 0.288$), 滑らかさ
11 指標 ($F = 0.88$, $p = 0.430$), 平均ジャーク ($F = 0.76$,
12 $p = 0.479$) のいずれについても有意差は認められな
13 かった。これらの結果から、背中角度の違いはクリッ
14 クに至るまでの「時間」には影響を与える一方で、コ
15 ントローラの空間軌跡そのものの形状や滑らかさに
16 は統計的に明確な差を生じさせていないといえる。す
17 なわち、本実験の課題設定の範囲内では、操作軌跡の
18 正確性や動作の平滑性は、体位条件によらず比較的一
19 貫していたと考えられる。体位の変化によって変動す
20 るのは主に開始から到達までの時間的経過であり、タ
21 スク内におけるターゲットポインティングの操作の
22 精度そのものは、姿勢の変化に対して高い安定性を有
23 しているといえる。

24 2-3. 考察

26 本実験の結果、背中の角度が座位から仰臥位へと変
27 化するにつれ、VR 空間におけるインタラクションのパ
28 フォーマンスおよび主観的評価に段階的な変容が生
29 じることが明らかとなった。反応時間および失敗回
30 数において、座位と比較して仰臥位で有意な低下が見
31 られた。一方で、右手コントローラの総軌跡長に有意
32 差が見られなかつた。このことから、ターゲットクリ
33 ックにおける右腕の運動は姿勢によらず維持されて
34 いることを示唆している。つまり、パフォーマンス低
35 下の主因は物理的な移動距離の増大ではなく、移動開
36 始までの初動の遅延や、クリック確定までの判断時間
37 の増加といった時間的、認知的なプロセスにあると解
38 釈できる。特に Anastasopoulos ら⁶⁾が指摘するように、
39 身体の傾斜は身体感覚情報の変化を伴い、主観的な垂
40 直知覚の不安定化を招く。仰臥位では座位と異なり、
41 背中全体への接地圧が優位となるため、脳内での空間
42 座標の再構築にコストを要し、それが反応時間の増大
43 に寄与したと考えられる。

44 特筆すべき知見として、仰臥位における主観的評価

46 と客観的データの乖離が挙げられる。インタビュー調
47 査では上方領域の操作が最も困難であるとの回答が
48 多数を占めたが、実際の反応時間は下方領域において
49 最大値を示した。この要因として、Previc⁷⁾が指摘する
50 視野の機能的分化が関連していると考えられる。Previc によれば、人間の下方視野は進化的に「身
51 体近傍空間 (near space)」の処理に特化していると
52 される。このことから、日常的に下方は操作しやすい
53 領域であるという強固な認知モデルが形成されると
54 考えられる。そのため、仰臥位という特殊な姿勢下に
55 おいても、参加者は下方の平均反応時間の増加を事前
56 に正しく予測できず、操作時に予期せぬ違和感が生じ
57 た結果、再確認行動を挟むことで反応時間が遅延した
58 と推察される。以上のことから、特定の体位条件下で
59 は、ユーザー自身の操作パフォーマンスの低下を正確
60 に認識、自覚できない可能性が示唆された。ただし、タ
61 スクの性質によっては、操作パフォーマンスよりも主
62 観的快適性が優先されるべきケースも存在する。例え
63 ば、高精度な操作を要しない遠隔通話アプリケーション
64 におけるボタン操作タスクにおいては、主観的快適
65 性を優先させることが総合的なユーザ－体験を向上
66 させる要因となり得る。したがって、VR インターフェ
67 ースの設計においては、パフォーマンスのみを指標と
68 するのではなく、利用目的や姿勢に応じた効率と快適
69 性のトレードオフを考慮したレイアウトの最適化が
70 求められる。

72 73 以上のことから、背中角度を倒した状態での VR 操作
74 においては、運動の滑らかさ自身を補正するよりも、
75 反応時間の遅延や精度の低下を前提としたユーザ－
76 インターフェイス(UI)デザイン、あるいは視覚的フィー
77 ドバックの工夫が重要になると考えられる。特に、ユ
78 ーザーが自覚しにくい「下方領域での操作遅延」や、
79 身体的負担を感じやすい「上方領域での疲労」を考慮
80 し、姿勢に応じたターゲット配置の最適化や、ポイン
81 ティングアシストの導入が求められる。

82 83 3. 実験 2：仰臥位における学習効果の検証

84 3-1. 目的と方法

85 本章では、特に操作の困難さが指摘されていた仰臥
86 位に着目し、短期間の反復試行を通じて、パフォーマン
87 スと身体技法がどのように変容するかを定量的に検
88 証する。これにより、長期的な利用や習熟を前提とした
89 VR インターフェイス設計における指針を得ることを

1 目的とする。実験の基本構成は前章の実験 1 に準拠し、
 2 球体ターゲットのクリックタスクを用いた。本実験で
 3 は、比較対象となる「座位」「半座位」「仰臥位」の 3 条
 4 件に加え、仰臥位姿勢において連続して 2 セッション
 5 (セッション 1・セッション 2) を実施することで、習
 6 熟の影響を評価した。また、姿勢保持における頭部の安
 7 定性や探索行動を評価するため、新たに体位条件ごと
 8 の頭部回転角を取得した。実験 1 からの変更点および
 9 追加された実験条件を表 2 に示す。

10
 11 なお、本実験においても実験 1 と同様の倫理的配慮
 12 に基づき、参加者への事前説明と書面による同意取得
 13 を行った。また、新たに計測項目に加わった頭部回転
 14 動作についても、参加者に無理な負担がかからないよ
 15 う配慮し、実験中に不快感や異常が認められた場合に
 16 は即座に中断する旨を再度徹底した上で実施した。

18 表 2 変更および追加された実験条件

19 Table 2 Changes and Additions to
 20 Experimental Conditions

区分	項目	内容
参加者	人数	13 名
	年齢	20~22 歳
取得指標	頭部回転角	クオータニオン

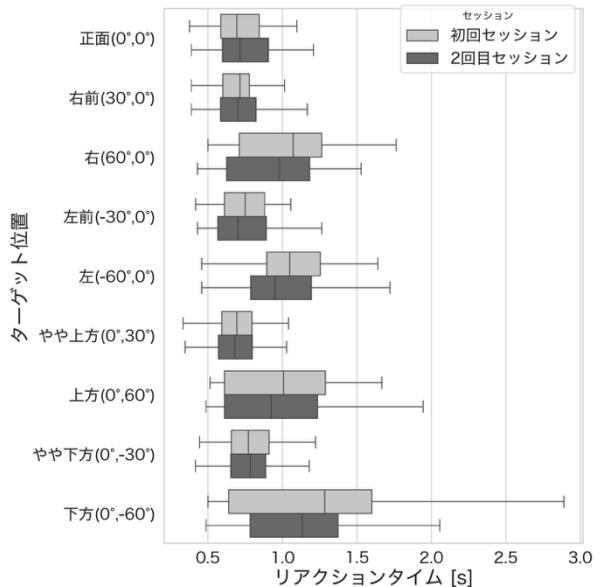
21 3-2. 結果

22 仰臥位姿勢における連続した 2 セッションの試行
 23 結果を図 8 に示す。各セッションのターゲット位置別
 24 反応時間を箱ひげ図にて示す。

25 初回セッションの平均反応時間は 0.90 s であったの
 26 に対し、2 回目セッションでは 0.87 s へと短縮が確認さ
 27 れた。しかし、Welch の t 検定の結果、セッション間に統
 28 計的な有意差は認められなかった ($t = 1.523, p = 0.128,$
 29 $d = 0.100$)。これにより、短期間の反復試行においては、
 30 操作の正確性を維持したまま、反応時間がわずかに改
 31 善する傾向がみられた。

32 各ターゲットにおけるセッション間の差を Welch の
 33 t 検定で比較したところ、すべてのターゲット位置にお
 34 いて有意な差は見られなかった。ただし、最も遅延の大
 35 きかった下方ターゲットにおいて、初回 (1.34 s) から
 36 2 回目 (1.14 s) にかけて平均値が約 0.2 s 短縮してお
 37 り、困難な領域ほど反復による改善幅が大きくなる可
 38 能性が示された。

41 能性が示された。



42 図 8 セッション別のターゲット位置ごとにおける反応時間
 43

44 Fig.8 Comparison of reaction times by target
 45 location across sessions

46

47

48 取得した頭部回転角を用いて、頭部回転量 (Head
 49 Rotation Magnitude) を式(3)のように定義した。ここ
 50 で、X,Y,Z はそれぞれヘッドマウントディスプレイ
 51 (HMD) の各軸まわりの回転角の合計値である。

$$52 \text{ Head Rotation Magnitude} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3)$$

53 平均回転量は、仰臥位で 13.45 °、半座位で 17.14 °、座
 54 位で 23.03 ° であり、背中角度が座位に近づくほど頭
 55 部の回旋運動が大きくなる傾向が顕著に現れ
 56 た。Welch の t 検定の結果、すべての条件間で極めて高
 57 い有意差が認められた (仰臥位-半座位 : $p = 0.0001$ 、仰
 58 臥位-座位 : $p = 0.0000$ 、半座位-座位 : $p = 0.0000$)。特に
 59 座位と仰臥位の比較では、効果量 Cohen's d が 0.70 と大
 60 きく、背中角度が仰臥位に近づくほど、ターゲット捕捉
 61 を頭部動作ではなく眼球運動で代替している可能性
 62 が示唆された。

63

64 体位条件ごとの反応時間の平均と標準偏差を図 3
 65 に示す。平均値としては半座位が 0.88 s と最も短く、次
 66 いで座位が 0.90 s、仰臥位が 0.90 s となった。Kruskal-
 67 Wallis 検定の結果 ($H = 1.749, p = 0.417$) および Welch の
 68 t 検定においても、姿勢間の全体的な反応時間に有意な
 69 差は認められなかった。これは、座位のパフォーマンス

1 が最も高かった実験 1 とは異なる結果である。

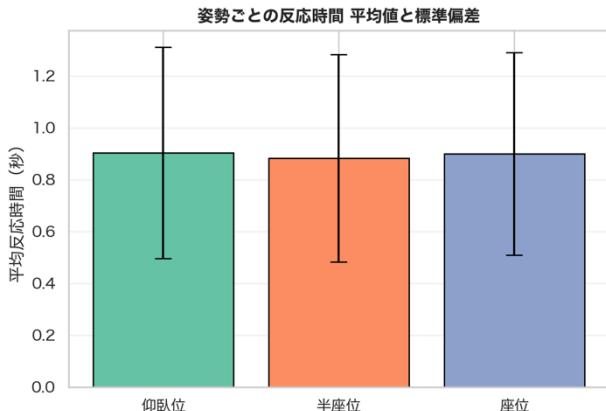


図9 体位条件ごとの反応時間

Fig.9 Reaction Times across Different Posture Conditions

一方で、ターゲットの方向別に見ると、体位ごとに特有の操作特性が確認された。特に真下方向のターゲット (Idx8: +0/-60)において、平均反応時間は仰臥位においては 1.34s であり、半座位においては 1.36s であった。これは、座位における 1.05 s と比較して遅延が大きく、仰臥位対座位 ($t=2.434, p=0.017, d=0.477$)、および半座位対座位 ($t=2.563, p=0.012, d=0.503$) のいずれにおいても有意な差が認められた。

また、実験終了後のインタビューでは、仰臥位において「上の方が最もクリックが難しかった」と複数人が回答していた。これは実験 1 と同様の結果である。

3-3. 考察

実験 2 の結果、体位条件間での全体的な反応時間に有意な差は認められず ($H=1.749, p=0.417$)、仰臥位においても座位と同等の反応時間を記録した。これは座位のパフォーマンスが最も高かった実験 1 の結果とは異なる傾向である。この要因として、実験 2 の参加者は 13 名のうち 9 名が実験 1 からの継続参加者であったことが考えられる。実験 2 内での短期間 (2 セッション間) の反復試行では、仰臥位における反応時間の有意な短縮は認められなかった。これは、仰臥位特有の制約、例えば枕による頭部への接触負荷や首の可動域制限などが、数十分程度の短期間の習熟のみでは解消困難であることを示唆している。ただし、最も反応時間が遅延していた下方ターゲット (Idx8)において、座位 (1.05 s) との差は依然として存在するものの ($t=2.434, p=0.017, d=0.477$)、セッションを通じて約 0.2 s の改善傾

32 向が見られた点は注目に値する。

33

34 以上のことから、仰臥位における VR 操作において、
35 短期間の身体的な慣れだけでは座位と同等の操作性
36 を得ることは困難であると考えられる。しかし、実験 1
37 から実験 2 にかけて体位条件間の反応時間の有意差
38 が消失したことは、中長期的な学習が身体的制約を補
39 完する可能性を示唆している。したがって、仰臥位を前
40 提とした VR システムにおいては、習熟による向上を
41 過度に期待するのではなく、大きな頭部動作を必要と
42 しない狭い範囲へのコンテンツ配置が求められる。特
43 に、実験 1 と実験 2 で示された通り体位ごとに特有の
44 操作特性や可動域の差異が確認されているため、体位
45 条件に最適化された動的な UI 配置の変更などの配慮
46 が不可欠である。また、下方視野などの物理的制限が強
47 い領域については、眼球運動を活かしたアイトラッキ
48 ングによるポインティング補完などの導入が、身体的
49 負荷の軽減と操作性の向上を両立させるための有効
50 なアプローチになると考えられる。

51

4. ガイドラインの提案

4-1. ガイドラインのスコープ

本章では、実験 1 と実験 2 を通じて得られたインテラクション特性に基づき、設計者および利用者向けのガイドラインを提示する。このガイドラインは、座位や立位とは背中角度が異なる仰臥位姿勢において HMD を用いて静的な指向操作を行う際の配慮事項を対象とする。具体的には、操作性・快適性・安全性の 3 つの観点から検討を行う。なお、本ガイドラインは、ISO 9241-820 (没入型環境における人間工学的ガイドライン) の第 6 章「仮想現実または複合現実におけるユーザーの関与」³⁾を補完する新節として位置づけることを想定した。

55

4-2. ユーザインターフェイスの配置

仰臥位におけるユーザインターフェイスの推奨配置範囲を図 10 に示す。実験 1 および実験 2 の結果から、仰臥位においては身体と支持面との接触による物理的な可動域制限に加え、下方視時における特有の操作性低下が確認された。これらの知見を踏まえ、仰臥位における適切な UI 配置に関して以下の指針を提案する。

第一に、実験 1において上方 0° ~ 30° の範囲で良好なパフォーマンスが確認されたことから、主要な操作

1 要素は視線基準(正面)から上方 0° ～ 30° の範囲に配置
2 することが望ましい.第二に,垂直角度 -30° 以下の領域,
3 特に反応時間の顕著な遅延が観察された -60° 付近へ
4 の主要 UI の配置は回避すべきである.第三に,水平方
5 向の操作範囲については,身体の回旋制限を考慮し, \pm
6 30° 以内を推奨範囲とし, $\pm 60^{\circ}$ を超える配置は可能な
7 限り排除することが適切である.

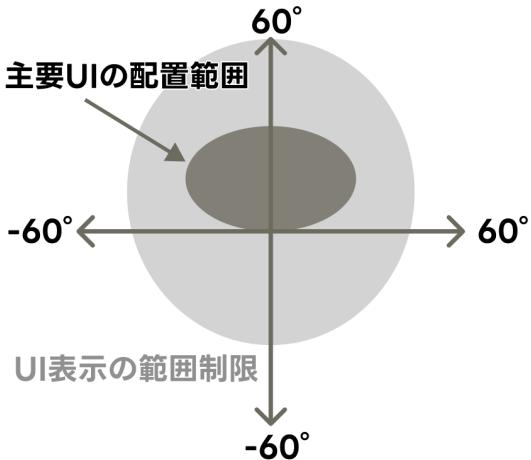


図 10 仰臥位における適切な UI の配置範囲

Fig.10 Recommended UI layout area for the supine position

8
9

10 4-3. 入力受付とフィードバック設計

11 仰臥位でVRを操作する経験が未熟な場合において
12 は,座位と比較して反応時間の有意な遅延を伴うこと
13 が明らかとなった.この結果を踏まえ,システム設計に
14 おいては以下の対応が求められる.第一に,入力受付時
15 間(タイムアウト設定等)については,座位時の基準値
16 に対して10%から20%程度の延長を確保することが
17 必要である.一方で,長期的な利用を通じて操作に習
18 熟したユーザーに対しては,自身のパフォーマンスに
19 合わせて受付時間を短縮するなど,任意にカスタマイ
20 ズできる設計が求められる.第二に,視覚的フィード
21 バックのみでは情報の欠落が生じやすい.本研究の実
22 験系を構築する際,予備的な参加者によるテストにお
23 いて操作感の不足が指摘されたため,聴覚的・触覚的
24 フィードバックを併用し,操作の成否を確実に提示す
25 るマルチモーダルな設計を重視すべきであると考え
26 る.

27

28 4-4. 安全性への配慮

29 仰臥位での利用は,HMDと接地面の間に熱が蓄積

30 しやすく,また実験1よりVR酔いを誘発しやすいと
31 いう特性を有する可能性が示唆された.ISO/TR 9241-
32 380:2022⁸⁾では,44 d°Cで3時間以上の熱蓄積は不快感
33 および危険性を伴うと指摘されており,この課題に対
34 し,設計においては通気性の高いフェイスクッション
35 の採用を検討し,熱蓄積の防止に努める必要がある.さ
36 らに,実験1の主観評価において背中角度が仰臥位に
37 近づくほどVR酔いが増加する傾向が確認されたこと
38 から,長時間の連続利用を抑制し,適宜姿勢の変更を促
39 す警告表示等の実装が推奨される.

40

41 4-5. 補助技術の導入と代替入力の推奨

42 実験2より,仰臥位における操作性は,座位と比較
43 して枕と頭部の接触などの物理的制約を伴い,その
44 特性の違いは短期間の習熟のみによって完全に解
45 消されるものではないことが示された.したがって,
46 ユーザーの習熟による解決を前提とするのではなく
47 ,仰臥位特有の操作感に最適化した補助技術の導
48 入が重要となる.特に,座位とは身体の可動域制限の
49 範囲が大きく異なるため,座位を基準とした頭部運
50 動のみによるターゲティングは,仰臥位において操
51 作負荷を増大させる懸念がある.そのため,頭部動作
52 を主眼とした設計をそのまま適用することは避け
53 るべきである.代替案として,アイトラッキングや
54 手,コントローラ,音声入力などを柔軟に併用でき
55 る環境の整備が求められる.

56

57 5. おわりに

58 本研究では,VR睡眠に代表される臥位姿勢での
59 VR利用需要の拡大を背景に,背中角度の違いが指
60 向操作タスクにおけるインタラクション特性に与
61 える影響を定量的に明らかにした.

62

63 実験1の結果から,初めて仰臥位で操作を行う
64 環境下では,座位と比較して反応時間が有意に遅
65 延し,特に下方視野領域における操作性が著しく
66 低下することが示された.この現象は,身体と床面の
67 接触による物理的な可動域制限に加え,人間の視野
68 における機能的分化に起因すると考えられる.また,
69 主観的評価と客観的データの乖離が確認され,ユー
70 ザー自身が平均反応時間の増加を正確に認識でき
71 ない可能性が示唆された.実験2では,仰臥位にお
72 ける習熟の影響を検証した.その結果,数十分程度
73 の短期間の反復試行では顕著なパフォーマンス向

1 上は認められなかつたが、実験 1 からの継続参加
2 者が多かつた本実験においては、体位間の全体的
3 な反応時間の有意差が消失するという結果が得ら
4 れた。これは、仰臥位特有の物理的制約は短期間の
5 慣れでは解消困難であるものの、中長期的な学習
6 や空間配置への習熟によって、座位と同等の反応
7 速度まで適応できる可能性を示唆している。

8
9 これらの知見に基づき、本研究では仰臥位での
10 VR 利用を想定したインターフェイス設計ガイド
11 ラインを提案した。主要 UI は視線基準から上方 0°
12 ~30° の範囲に配置すること、初学者向けの入力受
13 付時間は座位時の 10~20% 延長しつつユーザーに
14 よるカスタマイズを可能にすること、アイトラッキ
15 ングや音声入力などの代替入力手段を導入するこ
16 となど、具体的な設計および利用指針を示した。本指
17 針は、特定の姿勢が他方より優れていると断定す
18 るものではなく、姿勢ごとに異なるインタラクショ
19 ン特性が存在するという事実に着目したものであ
20 る。たとえ習熟によって全体の反応時間が同等とな
21 った場合でも、依然として下方視野の操作負担や
22 頭部可動域の差異といった姿勢固有の特性は残存
23 する。したがって、ユーザーが仰臥位での操作を選
24 択する状況においては、その身体的特性に最適化
25 された本指針を適用することで、姿勢に左右され
26 ない一貫したユーザー体験を構築することが不
27 可欠である。

28
29 本研究の限界として、実験参加者が 20~22 歳の
30 若年層に限定されていた点、実験時間が比較的短時
31 間であった点が挙げられる。今後の課題としては、よ
32 り広い年齢層を対象とした検証、長時間利用時の影
33 韻評価、そして提案したガイドラインの実装と効果
34 検証が必要である。VR 技術の発展により、今後ます
35 ます多様な姿勢での利用が広がることが予想され
36 る。本研究の成果が、高齢者や障害者を含むすべての
37 人々が、姿勢にとらわれず VR を通じてコミュニケーション
38 できる環境の実現に寄与することを期待
39 する。

40
41 **謝 辞**
42 本研究の実施にあたり、実験にご協力いただいた参
43 加者の皆様に深く感謝申し上げます。また、有益なご助
44 言をいただいた関係者の皆様に心より御礼申し上げ
45 ます。

47 **著者貢献**

48 三嶋泰生:概念化,方法論,実験実施,データ分析・整理,
49 執筆(原稿作成),執筆(レビューおよび編集校正),梅
50 澤幸太郎:概念化,方法論,執筆(レビューおよび編集校
51 正),吉武良治:概念化,方法論,指導,執筆(レビューおよ
52 び編集校正)

53

54 **付 記**

55 本論文の内容の一部は、日本人間工学会関東支部第
56 55回大会・第31回卒業研究発表会において発表した。
57

58 **文 献**

- 59 1) VRChat Inc. VRChat. <https://hello.vrchat.com/>, (参照
60 2025-12-27).
- 61 2) van Gemert, T.; Hornbæk, K.; et al. Towards a Bedder
62 Future: A Study of Using Virtual Reality while Lying
63 Down. CHI '23: Proceedings of the 2023 CHI
64 Conference on Human Factors in Computing Systems.
65 Hamburg, Germany, 2023-04-23/28, ACM, 2023, p.
66 1-18. <https://doi.org/10.1145/3544548.3580963>(参照
67 2025-10-17).
- 68 3) ISO 9241-820:2024. Ergonomics of human-system
69 interaction — Part 820: Ergonomic guidance on
70 interactions in immersive environments, including
71 augmented reality and virtual reality.
- 72 4) Kourtesis, P.; Linnell, J.; et al. Cybersickness in
73 Virtual Reality Questionnaire (CSQ-VR): A validation
74 and comparison against SSQ and VRSQ. Virtual
75 Worlds. 2023, 2(1), p. 16-35.
<https://doi.org/10.3390/virtualworlds2010002>, (参照
77 2025-12-25).
- 78 5) ISO/TS 9241-411:2012. Ergonomics of human-system
79 interaction — Part 411: Evaluation methods for the
80 design of physical input devices.
- 81 6) Anastasopoulos, D.; Bronstein, A.; Haslwanter, T.;
82 Fetter, M.; Dichgans, J. The role of somatosensory
83 input for the perception of verticality. Annals of the
84 New York Academy of Sciences. 1999, 871(1), p. 379-
85 383. [https://doi.org/10.1111/j.1749-
86 6632.1999.tb0199.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1999.tb0199.x), (参照 2025-12-27).
- 87 7) Previc, F. H. Functional specialization in the lower and
88 upper visual fields in humans: Its ecological origins
89 and neurophysiological implications. Behavioral and
90 Brain Sciences. 1990, 13(3), p. 519-575.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X00080018>, (参照
92 2025-12-25).

- 1 8) ISO/TR 9241-380:2022. Ergonomics of human-
- 2 system interaction — Part 380: Survey result of HMD
- 3 (Head-Mounted Displays) characteristics related to
- 4 human-system interaction.
- 5 9) Meta Platforms. "Meta Quest Developer Hub".
- 6 <https://developers.meta.com/horizon/documentation/utility/ts-mqdh/>, (参照 2025-12-24).
- 7