

■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の提案¹

三嶋 泰生², 梅澤 幸太郎³, 吉武 良治⁴

This study aims to clarify the effects of back recline angles (sitting, semi-supine, and supine positions) on VR interaction characteristics, against the backdrop of increasing demand for VR use in reclining positions, such as VR sleep. Participants performed a pointing task clicking targets arranged omnidirectionally using a Meta Quest 3, with evaluations focusing on reaction time, head movement, and subjective comfort. The results revealed that reaction times were significantly delayed in the supine position compared to the sitting position. Notably, operability for targets in the lower visual field markedly decreased. 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 placement 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と考えられ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ー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 インターフェー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.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 を通じて人と

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、臥位での研究は限局的である。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 は十分に解明されていない。さらに、ISO 9241-
17 820:2024「拡張現実や仮想現実を含む没入型環境にお
18 けるインタラクションに関する人間工学的ガイダン
19 ス」³⁾においても、座位や立位での利用を標準的な前提
20 としており、体位別の操作に関する明確なガイドライ
21 ンは存在しない。
22 本研究の目的は、背中角度の違い（座位・半座位・仰
23 臥位）が VR 空間における指向操作特性に与える影響
24 を定量的に明らかにすることである。具体的には、VR

1 受付：****年*月**日 受理：****年**月**日

2,3,4 芝浦工業大学

Shibaura Institute of Technology

1 空間に配置されたターゲットに対するクリックタ
2 スクを通じ、反応時間や頭部移動量、および主観的評価
3 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 インターフェース設計や利用のためのガイド
4 ラインを導出することを目指す。

7 2. 実験 1：背中角度の違いによる VR インタラ 8 クション特性の比較

9 2-1. 目的と条件

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



図 1 体位条件

18 本実験では、Unity で構築した球体ターゲットのク
19 リックタスクを用い、Meta Quest 3 と右手コントロー
20 ラのトリガーボタンを押下することによってターゲ
21 ットをクリックさせた。ターゲットは空間内の 9 位置
22 に配置され、各位置 4~6 回ずつランダムに提示する
23 構成とした。ターゲット配置の概略を図 2 に示す。

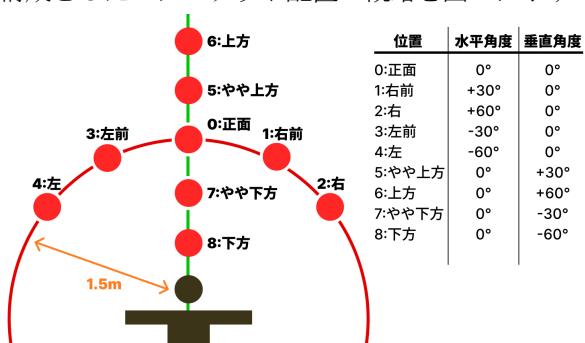


図 2 ターゲットの配置

25 評価指標として、反応時間、成功率、ミスクリック回
26 数に加え、右手コントローラの軌跡データを取得し、

27 軌跡長を算出した。また、VR 酔いの評価には CSQ-VR⁴⁾
28 に基づく 7 段階リッカート尺度の 6 項目を用い、各体
29 位条件におけるスコアを測定した。さらに、全実験終
30 了後に半構造化インタビューを実施した。その他の実
31 験条件については表 1 に示すとおりである。なお、本
32 実験の条件設定は ISO 9241-411⁵⁾ の 2D タスクを参考
33 にした。

34 本実験の実施にあたっては、研究倫理に十分配慮し
35 た。実験開始前に、すべての参加者に対して研究の目的、
36 手法、データの取り扱い（個人情報の保護および学術利用の限定）について詳細な説明を行い、書面にて
37 同意を得た。その際、VR 酔いによる身体的負荷の可
38 能性について特に注意を促すとともに、体調に異変を
39 感じた場合やその他の理由により継続が困難と判断
40 した場合には、いつでもペナルティなく実験を中断・
41 辞退できる権利があることを明示した。また、実験中
42 は常に研究者が参加者の状態を監視し、異常が認めら
43 れた場合には即座に実験を中止する体制を整えた。

44

| 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 | 視覚 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 | 芝浦工業大学内の明室 |
| | 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) |

表 1 その他の実験条件

48 49 50 2-2. 結果

1 体位条件ごとの平均反応時間を図3に示す。反応時
2 間は座位が最も短く(0.848 s),半座位(0.960 s),
3 仰臥位(1.019 s)の順に延長しており,背中角度の減
4 少に伴ってパフォーマンスが低下する傾向が確認さ
5 れた。失敗回数は座位で0.042回,半座位で0.069回,
6 仰臥位で0.156回となり,誤操作も仰臥位で最も増加
7 していた。

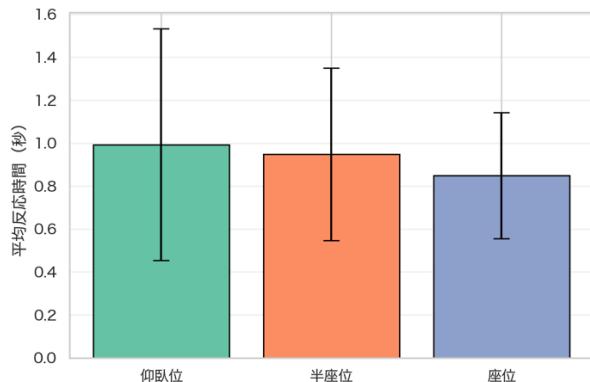


図3 体位条件ごとの反応時間

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

16 つぎに,体位条件別の角度別平均反応時間を比較す
17 る。分析にはKruskal-Wallis検定を用い,事後検定と
18 してBonferroni補正を伴うMann-WhitneyのU検定お
19 よびWelchのt検定を併用した。

20 図4,図5,図6に座位,半座位,仰臥位における角
21 度別平均反応時間を示す。

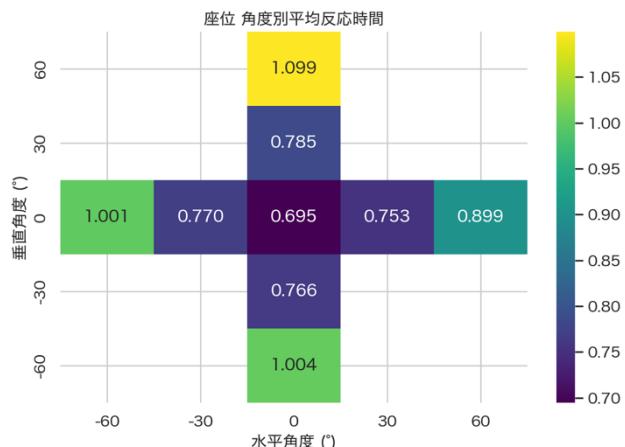


図4 座位における角度別平均反応時間

24 座位においては,水平方向および垂直方向のいずれ
25 においても有意な反応時間の差が認められた。
26 水平方向においては,正面方向(0.695 s)が最も速
27 く,左右に離れるに従って反応時間は遅延する傾向を
28 示した。垂直方向においても,正面方向が最も速く,上
29 段方向では,30°(0.785 s)に比べ60°(1.099 s)
30 で顕著な遅延が認められた。垂直方向においても中段
31 から上下に離れるほど反応時間が有意に長くなると
32 いう傾向が確認された。

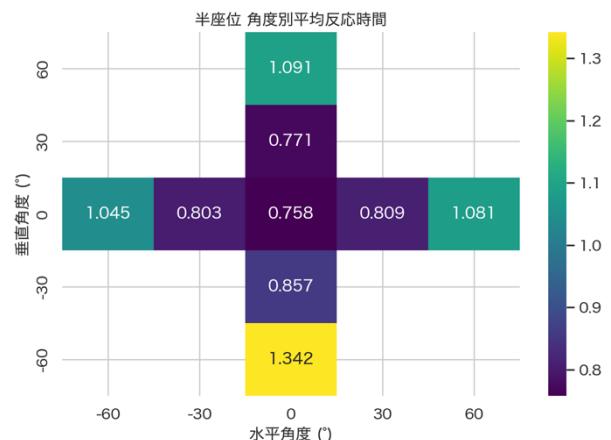


図5 半座位における角度別平均反応時間

33 半座位においては,水平方向および垂直方向のいず
34 れにおいても有意な反応時間の差が認められた。
35 水平方向においては,正面方向(0.758 s)が最も速く,
36 左右に離れるに従って反応時間は遅延する傾向を示
37 した。垂直方向においても,正面方向が最も速く,上段
38 方向では30°(0.771 s)に比べ60°(1.091 s)
39 で大幅な遅延が認められた。

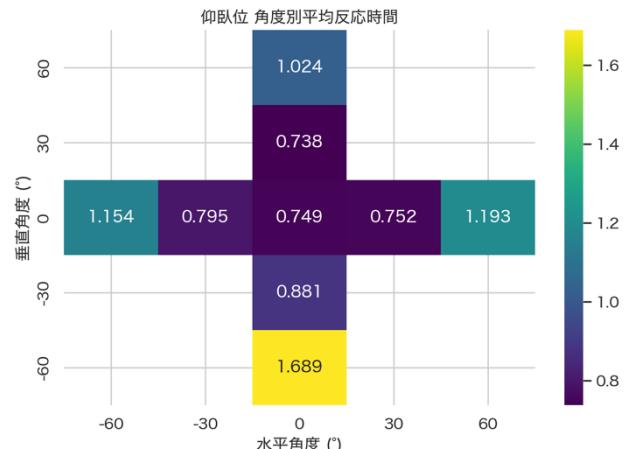


図6 仰臥位における角度別平均反応時間

42 仰臥位においては,水平方向および垂直方向のいず
43 れにおいても有意な反応時間の差が認められた。水平

1 方向においては、正面方向 (0.749 s) が最も速く、左
2 右に離れるに従って反応時間は遅延する傾向を示し
3 た。垂直方向においても、正面方向が最も速く、上段方
4 向では 30° (0.738 s) に比べ 60° (1.024 s) で
5 頗著な遅延が認められた。また、下段方向においては
6 60° (1.689 s) で反応時間が極めて有意に長くなっ
7 ており、垂直方向の周辺部において他の姿勢よりも大
8 幅な反応遅延が生じる傾向が確認された。

9 一方で実験終了後のインタビューでは、「上の方が
10 最もクリックが難しかった」と複数人が回答しており、
11 定量データと主観データの乖離が確認された。
12

13 体位条件ごとの頭部移動量を比較した結果、平均値
14 は半座位で最も大きく (2.835 m)、次いで座位 (2.364
15 m)、仰臥位 (2.204 m) の順となった。中央値において
16 も、半座位 (3.097 m) が最も高い値を示し、仰臥位
17 (2.182 m) や座位 (2.337 m) を上回る結果となった。
18 各体位間の差についてクラスカル・ウォリス検定を行
19 った結果、統計的な有意差は認められなかった ($H =$
20 3.6772, $p = 0.1590$)。

21 主観的な VR 酔いの評価には、CSQ-VR を用いた。CSQ-
22 VR は、VR 環境における酔い (VRSE) を評価するため
23 に Kourtesis らによって開発された指標であり、吐き
24 気 (Nausea)、前庭感覚 (Vestibular)、眼球運動
25 (Oculomotor) の 3 カテゴリー、計 6 項目で構成され
26 ている。各項目は「1:Absent (なし)」から「7:Extreme
27 (極限)」までの 7 段階のリッカート尺度で回答を求
28 めるものである。スコアの算出にあたっては、各項目
29 の合計値を「VR 酔いスコア」とした。この算出方法に
30 より、VR 酔いスコアの理論上の最小値は 6、最大値は
31 42 となる。

$$33 \quad CSQ - VR Score =$$

$$34 \quad \sum (Nausea + Vestibular + Oculomotor)$$

35 本研究における体位条件ごとの VR 酔いスコアの比
36 較結果を図 7 に示す。VR 酔いスコアの平均は、座位が
37 12.92、半座位が 15.0、仰臥位が 17.17 であった。平均
38 値の推移を見ると、背中角度が小さくなり体幹が寝た
39 状態に近づくほど VR 酔いスコアが増加する傾向がみ
40 られた。

41 しかし、一元配置分散分析の結果、VR 酔いスコアに
42 統計的な有意差は認められなかった ($F(2, 33) =$
43 0.71, $p = 0.498$)。以上のことから、本実験の条件下に
44 おいては、背中角度の変動が主観的な VR 酔いの強さ

46 に及ぼす影響は、統計的に明確なものとは言えないこ
47 とが示唆された。ただし、平均値の順序は「座位 < 半
48 座位 < 仰臥位」と一貫しており、サンプルサイズの
49 拡大や VR コンテンツの曝露時間の調整により、異なる
50 結果が得られる可能性も残されている。

VR酔いスコアの体位間比較

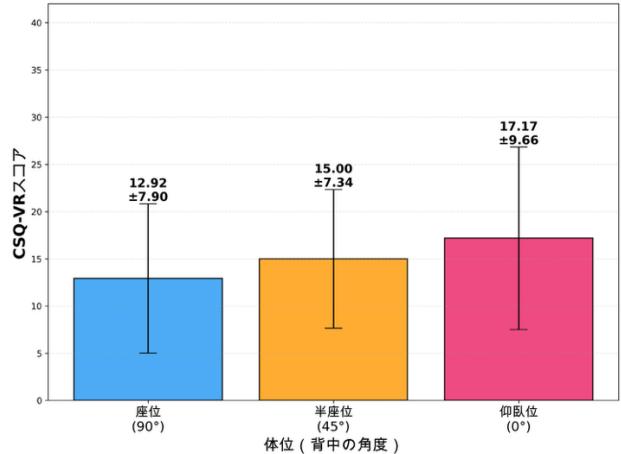


図 7 体位条件別の VR 酔いスコアの比較

51
52
53 右手コントローラの操作特性を定量化するために、
54 以下の指標を算出した。各サンプルの位置 p_i を、タイ
55 ムスタンプを t_i とすると、各サンプル間の速度 v_i は次
56 式で定義される。

$$57 \quad v_i = \frac{|p_i - p_{i-1}|}{t_i - t_{i-1}}$$

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

$$62 \quad Smoothness = \frac{std(v_i)}{mean(v_i)}$$

63 なお、本指標は値が小さいほど動作が滑らかである
64 ことを示す。さらに、速度列の勾配から加速度 a_i 、およ
65 びジャーカ j_i を順次求め、その平均値 ($Mean\ Jerk$) を
66 算出した。

67 右手コントローラの総軌跡長の平均は、座位が
68 21.06 mm、半座位が 21 mm 前後、仰臥位が 22.66 mm
69 程度であり、仰臥位でやや長い傾向はあったものの、
70 大きな差ではなかった。平均曲率、滑らかさ指標、平均
71 ジャーカについても同様であり、いずれの指標も体位
72 条件による大きな違いはみられなかった。

73 一元配置分散分析の結果、総軌跡長 ($F = 0.17$, $p =$
74 0.842)、平均曲率 ($F = 1.32$, $p = 0.288$)、滑らかさ
75 指標 ($F = 0.88$, $p = 0.430$)、平均ジャーカ ($F = 0.76$,
76 $p = 0.479$) のいずれについても有意差は認められな

1 かつた.これらの結果から,背中角度の違いはクリック
2 に至るまでの「時間」には影響を与える一方で,コ
3 ントローラの空間軌跡そのものの形状や滑らかさに
4 は統計的に明確な差を生じさせていないといえる.

5 すなわち,本実験の課題設定の範囲内では,操作軌
6 跡の正確性や動作の平滑性は,体位条件によらず比較
7 的一貫していると結論付けられる.体位の変化によっ
8 て変動するのは主に開始から到達までの時間的経過
9 であり,タスク内におけるターゲットポイントタイミング
10 の操作の精度そのものは,姿勢の変化に対して高い安
11 定性を有しているといえる.

12

13 2-3. 考察

14 本実験の結果,背中の角度が座位から仰臥位へと変
15 化するにつれ,VR空間におけるインタラクションのパ
16 フォーマンスおよび主観的評価に段階的な変容が生
17 じることが明らかとなった.

18

19 反応時間および失敗回数において,座位と比較して
20 仰臥位で有意な低下が見られた.一方で,右手コント
21 ローラの総軌跡長に有意差が見られなかった.このこ
22 とから,ターゲットクリックにおける右腕の運動は姿
23 勢によらず維持されていることを示唆している.つまり,
24 パフォーマンス低下の主因は物理的な移動距離の
25 増大ではなく,移動開始までの初動の遅延や,クリック
26 確定までの判断時間の増加といった時間的,認知的
27 なプロセスにあると解釈できる.特にAnastasopoulos
28 ら⁶⁾が指摘するように,身体の傾斜は身体感覚情報の
29 変化を伴い,主観的な垂直知覚の不安定化を招く.仰
30 臥位では座位と異なり,背中全体への接地圧が優位と
31 なるため,脳内での空間座標の再構築にコストを要し,
32 それが反応時間の増大に寄与したと考えられる.

33

34 特筆すべき知見として,仰臥位における主観的評価
35 と客観的データの乖離が挙げられる.インタビュー調
36 査では上方領域の操作が最も困難であるとの回答が
37 多数を占めたが,実際の反応時間は下方領域において
38 最大値を示した.この要因として,Previc⁷⁾が指摘する
39 視野の機能的分化が関連していると考えられる.Previc
40 によれば,人間の下方視野は進化的に「身
41 体近傍空間 (near space)」の処理に特化していると
42 される.このことから,日常的に下方は操作しやすい
43 領域であるという強固な認知モデルが形成されると
44 考えられる.そのため,仰臥位という特殊な姿勢下に
45 おいても,参加者は下方の操作困難性を事前に正しく

46 予測できず,操作時に予期せぬ違和感が生じた結果,
47 再確認行動を挟むことで反応時間が遅延したと推察
48 される.以上のことから,特定の体位条件下では,ユー
49 ザー自身が操作困難性を正確に認識,自覚できない可
50 能性が示唆された.

51

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

61

62 3. 実験2: 仰臥位における学習効果の検証

63 3-1. 目的と条件

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

70 実験の基本構成は前章の実験1に準拠し,球体タ
71 ゲットのクリックタスクを用いた.本実験では,比較対
72 象となる「座位」「半座位」「仰臥位」の3条件に加え,
73 仰臥位姿勢において連続して2セッション(セッショ
74 ン1・セッション2)を実施することで,習熟の影響を
75 評価した.また,姿勢保持における頭部の安定性や探索
76 行動を評価するため,新たに体位条件ごとの頭部回転
77 角を取得した.実験1からの変更点および追加された
78 実験条件を以下の表2に示す.

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

85

| 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 |
|------|-------|---------|
|------|-------|---------|

表 2 変更および追加された実験条件

3-2. 結果

仰臥位姿勢における連続した 2 セッションの試行結果を示す。図 8 に、各セッションのターゲット位置別反応時間の箱ひげ図を示す。

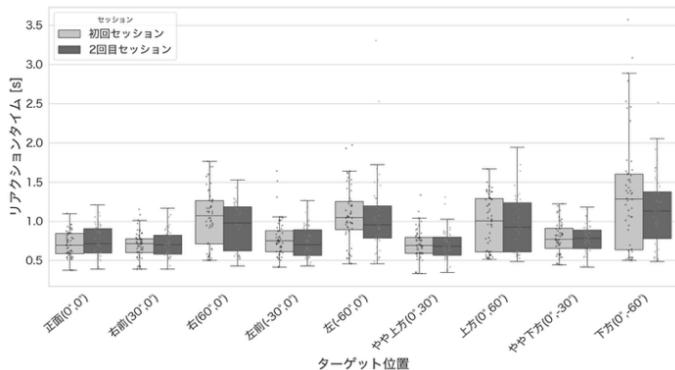


図 8 セッション別のターゲット位置ごとにおける反応時間

初回セッションの平均反応時間は 0.903 s であったのに対し、2 回目セッションでは 0.865 s へと短縮が確認された。しかし、Welch の t 検定の結果、セッション間に統計的な有意差は認められなかった ($t = 1.523, p = 0.128, d = 0.100$)。これにより、短期間の反復試行においては、操作の正確性を維持したまま、反応時間がわずかに改善する傾向が示唆された。

各ターゲットにおけるセッション間の差を Welch の t 検定で比較したところ、すべてのターゲット位置において有意な差は見られなかった。ただし、最も遅延の大さきかった下方ターゲットにおいて、初回 (1.344 s) から 2 回目 (1.137 s) にかけて平均値が約 0.2 s 短縮しており、困難な領域ほど反復による改善幅が大きくなる可能性が示された。

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

$$\text{Head Rotation Magnitude} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

平均回転量は、仰臥位で 13.45° 、半座位で 17.14° 、座位で 23.03° であり、背中角度が座位に近づくほど頭部の回旋運動が大きくなる傾向が顕著に現れた。Welch の t 検定の結果、すべての条件間で極めて高

い有意差が認められた（仰臥位-半座位 : $p = 0.0001$ 、仰臥位-座位 : $p = 0.0000$ 、半座位-座位 : $p = 0.0000$ ）。特に座位と仰臥位の比較では、効果量 Cohen's d が 0.70 と大きく、背中角度が仰臥位に近づくほど、ターゲット捕捉を頭部動作ではなく眼球運動で代替している可能性が示唆された。

3-3. 考察

実験 2 の結果、仰臥位における反復試行は、反応時間という表面的なパフォーマンスの向上には繋がらなかつた。2 セッション目において反応時間の平均値に短縮傾向が認められたが、統計的有意差は得られなかつた。この結果は、仰臥位特有の制約、例えば枕による頭部への接触負荷などが、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において約 0.2 s の改善が見られた点は注目に値する。これは、困難な領域ほど適応の余地が大きいことを示唆している。しかしながら、この改善をもってしても座位の平均水準には到達しておらず、下方視野における操作は、短期間の反復試行による身体的な慣れだけでは完全に克服できないと考えられる。

以上のことから、仰臥位を前提とした VR システムにおいては、習熟によるパフォーマンス向上を過度に期待するのではなく、大きな頭部動作を必要としない狭い範囲へのコンテンツ配置が求められる。また、眼球運動を活かしたアイトラッキングによるポインティング補完などの導入が、身体的負荷の軽減と操作性の向上を両立させると考えられる。

4. ガイドラインの提案

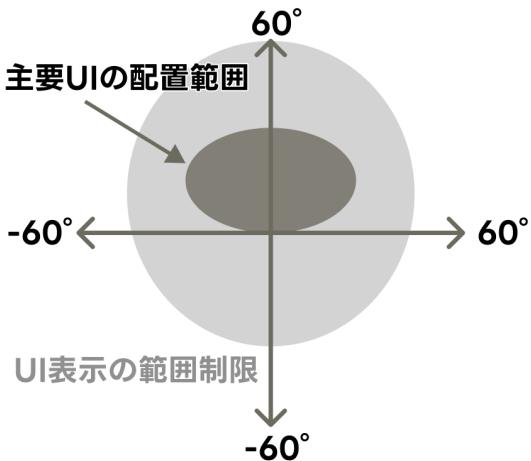
4-1. ガイドラインのスコープ

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られることを想定している。

1
2 4-2. ユーザインターフェースの配置

3 仰臥位におけるユーザーインターフェースの推奨配
4 置範囲を図 8 に示す。実験 1 および実験 2 の結果から、
5 仰臥位においては身体と支持面との接触による物理
6 的な可動域制限に加え、下方視時における特有の操作
7 性低下が確認された。これらの知見を踏まえ、仰臥位に
8 おける適切な UI 配置に関して以下の指針を提案する。



9 図 8 仰臥位における適切な UI の配置範囲

10
11 第一に、実験 1 において上方 0° ~ 30° の範囲で良
12 好なパフォーマンスが確認されたことから、主要な操
13 作要素は視線基準(正面)から上方 0° ~ 30° の範囲に配
14 置することが望ましい。第二に、垂直角度 -30° 以下の領域、特に反応時間の顕著な遅延が観察された -60° 付近
15 への主要 UI の配置は回避すべきである。第三に、水平
16 方向の操作範囲については、身体の回旋制限を考慮し、
17 $\pm 30^{\circ}$ 以内を推奨範囲とし、 $\pm 60^{\circ}$ を超える配置は可能
18 な限り排除することが適切である。

21 4-3. 入力受付とフィードバック設計

22 仰臥位での操作は、座位と比較して反応時間の有意
23 な遅延を伴うことが明らかとなった。この結果を踏ま
24 え、システム設計においては以下の対応が求められる。
25 第一に、入力受付時間(タイムアウト設定等)について
26 は、座位時の基準値に対して 10% から 20% 程度の延長
27 を確保することが必要である。第二に、視覚的フィード
28 バックのみでは情報の欠落が生じやすい。本研究の
29 実験系を構築する際、予備的な参加者によるテストに
30 おいて操作感の不足が指摘されたため、聴覚的・触覚的
31 フィードバックを併用し、操作の成否を確実に提示

32 するマルチモーダルな設計を重視すべきであると判
33 断した。

34 35 4-4. 安全性への配慮

36 仰臥位での利用は、HMD と接地面の間に熱が蓄積
37 しやすく、また実験 1 より VR 酔いを誘発しやすいと
38 いう特性を有する。ISO/TR 9241-380:2022⁸⁾ では、 44°C
39 で 3 時間以上の熱蓄積は不快感および危険性を伴う
40 と指摘されており、この課題に対し、設計においては通
41 気性の高いフェイスクッションの採用を検討し、熱蓄
42 積の防止に努める必要がある。さらに、実験 1 の主観評
43 価において背中角度が仰臥位に近づくほど VR 酔いが
44 増加する傾向が確認されたことから、長時間の連続利
45 用を抑制し、適宜姿勢の変更を促す警告表示等の実装
46 が推奨される。

47 48 4-5. 補助技術の導入と代替入力の推奨

49 実験 2 より、仰臥位における操作性の低下は短期
50 間の習熟によって容易に解消されるものではなく、
51 姿勢固有の生理的・物理的制約に起因する側面が強
52 いことが示された。

53 したがって、ユーザーの学習効果に依存するので
54 なく、システム側による補助技術の導入が重要と
55 なる。特に、身体の可動域制限が顕著となる姿勢に
56 おいては、頭部運動のみによるターゲティングは操
57 作負荷を増大させるため、これを主眼とした設計は
58 避けるべきである。代替案として、アイトラッキン
59 グや手、コントローラ、音声入力などを柔軟に併用
60 できる環境の整備が求められる。

61 62 5. おわりに

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

67 実験 1 の結果から、仰臥位では座位と比較して反
68 応時間が有意に遅延し、特に下方視野領域における
69 操作性が著しく低下することが示された。この現象
70 は、身体と床面の接触による物理的な可動域制限に
71 加え、人間の視野における機能的分化に起因すると
72 考えられる。また、主観的評価と客観的データの乖離
73 が確認され、ユーザー自身が操作困難性を正確に認
74 識できない可能性が示唆された。

1 実験 2 では,仰臥位における短期的な学習効果を
2 検証した結果,反復試行による顕著なパフォーマン
3 ス向上は認められなかった.この結果は,仰臥位特有
4 の制約が習熟のみでは解消困難であることを示し
5 ている.一方で,頭部回転量の分析から,背中角度が
6 仰臥位に近づくほど眼球運動への依存度が高まる
7 ことが明らかとなった.

8 これらの知見に基づき,本研究では仰臥位での
9 VR 利用を想定したインターフェース設計ガイド
10 ラインを提案した.主要 UI は視線基準から上方 0°
11 ~30° の範囲に配置すること,入力受付時間を座位
12 時の 10~20 % 延長すること,アイトラッキングや
13 音声入力などの代替入力手段を導入することなど,
14 具体的な設計および利用指針を示した.

15 本研究の限界として,実験参加者が 20~22 歳の
16 若年層に限定されていた点,実験時間が比較的短時
17 間であった点が挙げられる.今後の課題としては,よ
18 り広い年齢層を対象とした検証,長時間利用時の影
19 響評価,そして提案したガイドラインの実装と効果
20 検証が必要である.

21 VR 技術の発展により,今後ますます多様な姿勢
22 での利用が広がることが予想される.本研究の成果
23 が,高齢者や障害者を含むすべての人々が,姿勢にと
24 らわれず VR を通じてコミュニケーションできる
25 環境の実現に寄与することを期待する.

27 利益相反

28 本研究に関して,開示すべき利益相反関係はない.

30 謝 辞

31 本研究の実施にあたり,実験にご協力いただいた参
32 加者の皆様に深く感謝申し上げます.また,研究環境を
33 提供していただいた芝浦工業大学,ならびに有益なご
34 助言をいただいた関係者の皆様に心より御礼申し上
35 げます.

37 著者貢献

38 梅澤幸太郎:概念化,方法論,執筆(レビューおよび編
39 集校正), 吉武良治:概念化,資金獲得,方法論,指導,執筆
40 (レビューおよび編集校正)

42 付 記

43 本論文の内容の一部は,日本人間工学会関東支部第
44 55 回大会・第 31 回卒業研究発表会において発表した.

46 文 献

- 47 1) VRChat Inc. VRChat. <https://hello.vrchat.com/>, (参照
48 2025-12-27).
- 49 2) van Gemert, T.; Hornbæk, K.; et al. Towards a Bedder
50 Future: A Study of Using Virtual Reality while Lying
51 Down. CHI '23: Proceedings of the 2023 CHI
52 Conference on Human Factors in Computing Systems.
53 Hamburg, Germany, 2023-04-23/28, ACM, 2023, p.
54 1-18. <https://doi.org/10.1145/3544548.3580963>(参照
55 2025-10-17).
- 56 3) ISO 9241-820:2024. Ergonomics of human-system
57 interaction — Part 820: Ergonomic guidance on
58 interactions in immersive environments, including
59 augmented reality and virtual reality.
- 60 4) Kourtesis, P.; Linnell, J.; et al. Cybersickness in
61 Virtual Reality Questionnaire (CSQ-VR): A validation
62 and comparison against SSQ and VRSQ. Virtual
63 Worlds. 2023, 2(1), p. 16-35.
<https://doi.org/10.3390/virtualworlds2010002>, (参照
64 2025-12-25).
- 66 5) ISO/TS 9241-411:2012. Ergonomics of human-system
67 interaction — Part 411: Evaluation methods for the
68 design of physical input devices.
- 69 6) Anastasopoulos, D.; Bronstein, A.; Haslwanter, T.;
70 Fetter, M.; Dichgans, J. The role of somatosensory
71 input for the perception of verticality. Annals of the
72 New York Academy of Sciences. 1999, 871(1), p. 379-
73 383. [https://doi.org/10.1111/j.1749-
74 6632.1999.tb09199.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1999.tb09199.x), (参照 2025-12-27).
- 75 7) Previc, F. H. Functional specialization in the lower and
76 upper visual fields in humans: Its ecological origins
77 and neurophysiological implications. Behavioral and
78 Brain Sciences. 1990, 13(3), p. 519-575.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X00080018>, (参照
79 2025-12-25).
- 81 8) ISO/TR 9241-380:2022. Ergonomics of human-
82 system interaction — Part 380: Survey result of HMD
83 (Head-Mounted Displays) characteristics related to
84 human-system interaction.
- 85 9) Meta Platforms. "Meta Quest Developer Hub".
<https://developers.meta.com/horizon/documentation/utility/ts-mqdh/>, (参照 2025-12-24).
- 88 10) Apple. "Designing for visionOS – Human Interface
89 Guidelines".
<https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/designing-for-visionos/>, (参照 2025-12-
92 24).