

VR 空間における映像と前庭感覚提示の組み合わせによる傾斜の提示効果の実験的調査 —IVRC 参加作品「グラビティ・パラドックス」での事例—

小倉綾介¹ 大谷駿介¹ 竹島光一¹ 北川大智¹ 牛田啓太¹

概要：筆者らは、IVRC 2024 でインタラクティブ作品「グラビティ・パラドックス」を出展した。この作品では、重力を操りながら仕掛けをくぐり抜け、館から脱出する体験をする。作品における重力の変化は、HMD からの映像提示と、自作の 1 軸モーションベースによる傾斜の提示で表現した。展示においては、この組み合わせが効果的に機能し、体験者は「重力の変化」を楽しんでいるようだった。本稿では、この組み合わせ効果を、実験的に調査する。モーションベースによる傾斜の提示の有無と、HMD の映像で提示する傾斜の組み合わせで、条件を変えながら、利用者がどれほどの傾斜を感じているかを調べた。前・後ろいずれの傾斜の提示の場合でも、モーションベースによる傾斜が提示された場合のほうが映像で提示された傾きをより大きく感じる事がわかった。

1. はじめに

筆者らのグループでは、日本バーチャルリアリティ学会が開催する IVRC 2024^{*1}でインタラクティブ作品「グラビティ・パラドックス」[1]を出展した。重力を操れるピークルに乗って、奇妙な館から脱出するストーリーの作品である。ピークルの「機能」によって重力を変化させ、館の仕掛けをくぐり抜けていく。作品においては、重力の変化を、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）による映像提示だけでなく、自作の 1 軸モーションベースと組み合わせて演出した。このモーションベースは、ステージを前後に傾けられる。展示では、この組み合わせが効果的に働き、体験者や審査員から高い評価を得た。

本稿では、この作品における、「映像による重力変化の提示」に加えた「モーションベースによる傾斜の提示」が、体験者の重力変化の体感（＝傾きの体感）にどのような効果があったかを実験的に調査する。

2. インタラクティブ作品「グラビティ・パラドックス」[1]

「グラビティ・パラドックス」は、「わたしたちを地上に縛り付ける重力をバーチャルリアリティ（VR）世界では操りたい」という着想をもとに制作したインタラクティブ作品である。設定は、超科学的なピークルに乗り、仕掛けをクリアしながら奇妙な館から脱出するというものである。

体験者が操るピークルは、館の中を走行するだけでなく、重力の向きを変化させる機能を持っている。これにより、「下」の向きを変え、壁や天井を走行し、また、重力の向きを変えないと解けない仕掛けを突破して、館からの脱出を目指す。

体験者は HMD（Meta Quest 3）を装用し、映像はここから提示される^{*2}。図 1 のように、脱出の舞台となる館の映像が提示される。重力の変化は HMD から提示される映像でも示



図 1：「グラビティ・パラドックス」で HMD から体験者に提示される（脱出する館の）映像



図 2：IVRC 2024 での「グラビティ・パラドックス」の展示のようす（中央が自作したモーションベース）

されるが、触覚や体勢感覚にも訴えるために、1 軸モーションベースを自作して、実際に傾きを提示することにした（図 2）。このモーションベースは、エアシリンダを電磁弁で（Arduino を用いて）制御して、前または後ろに約 8 度傾けられる。モーションベースは、映像に連動して傾く。モーションベースのステージには椅子が据え付けられており、体験者はここに座る。体験者は、モーションベースのステージに取り付けられたジョイスティックでピークルを操作する。そ

^{*2} IVRC 2024 の LEAP STAGE（決勝大会）では、HMD の装用に健康上の懸念があるとされる子ども向けに、プロジェクタからの映像も用意し、それでも体験できるようにした。

¹ 工学院大学

^{*1} <https://ivrc.net/2024/>

の他の演出として、ピークルが重力に引かれて落下していく感覚の演出に、ファンを取り付け風を送っている。体験者にはヘッドフォンも装着させ、立体音響による演出も行っている。

コンテンツとしては (Unity で開発されている)、体験者は、ピークルを進めながら、重力を変化させながら、仕掛けを突破し、館からの脱出を目指す。その仕掛けには、たとえば天井から続く廊下 (壁が下になるように重力を変化させて進入する)、開かないドア (重力を変化させて部屋の調度品をドアに向かって落として破り開ける) などがある。

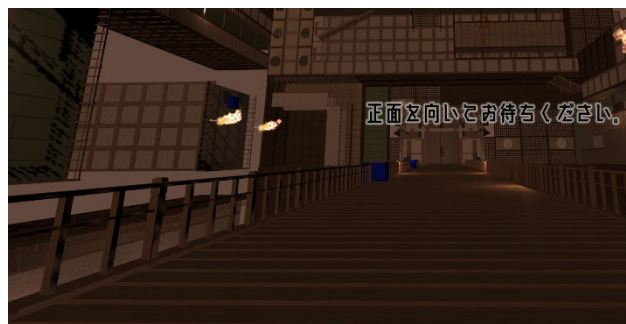
筆者らは、この「グラビティ・パラドックス」で、IVRC 2024 の書類審査, SEED STAGE (予選大会) を通過し, LEAP STAGE (決勝大会) まで進出した。体験者からは、モーションベースの傾きと映像の組み合わせで提示される重力変化が好評であった。本稿では、この組み合わせの効果を、実験的に調査する。

3. 関連研究

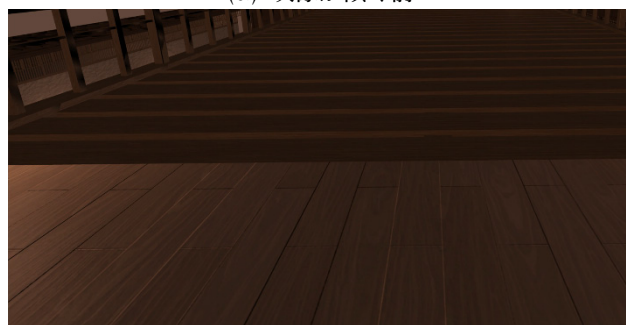
傾斜などの体勢感覚を提示するのに直接的な手法はモーションベース (モーションプラットフォーム) である[2, 3]。高性能なモーションベースは高価でスペースが必要なため、簡易なもの[4, 5]も開発されている。「グラビティ・パラドックス」で製作したモーションベースは、この簡易なモーションベースの系譜に属するものと言える。IVRC でも、小さな傾斜を提示する 2 自由度のモーションベースを備えた作品「めい迷路ろ」が出展されている[6]。また、文献[7-9]では、元々モーションベースでないものをモーションベースに転用して使用している。また、映像とウェアラブルデバイスを用いて体勢感覚 (傾斜) を提示する検討もなされている[10]。

映像と傾斜の感覚についての関連研究について述べる。文献[11]では、身体を傾かせるのと同時に映像を傾かせること、傾斜を強く感じる者と弱く感じる者に分かれることを報告している。文献[12]では、被験者が体勢を傾けた際に、映像の傾きを変えながら提示したところ、体勢の傾斜との違いに気づきやすい者、増加方向に映像を傾けたものに気づきにくい者、減少方向に映像を傾けたものに気づきにくい者との 3 とおりに分かれると報告している。文献[13]では、アトラクション (VR ジェットコースターなど) での活用を念頭に、実空間での坂道の角度 (と曲率半径) が、視覚刺激によってどの程度増幅できるかについての実験を実施している。文献[14]では運転シミュレータにおいてカーブの際映像を傾斜させることの体験者への効果を調べている。

本稿では、IVRC 作品「グラビティ・パラドックス」での演出に準じて、映像内の傾斜と実際の傾斜の組み合わせ効果を実験で調べる。



(a) 映像が傾く前



(b) 映像が前方に傾いた後

図 3：実験で提示した映像例

4. 傾斜の提示効果の実験

4.1. 実験の目的

「グラビティ・パラドックス」の作品の演出として効果が高かった、モーションベースによる傾斜と映像の組み合わせによる重力変化 (= 傾き) の提示の効果を実験で調査する。モーションベースの傾斜を伴わせることで、映像からの傾斜の感覚が変化するか (仮説としては、どれほど増幅されるか) を実験で調査する。また、前への傾き提示と後ろへの傾き提示で違いがあるかも調査する。

4.2. 実験の概要と手順

被験者には、モーションベースに据え付けられた椅子に座ってもらい、HMD を装着してもらう。前または後ろに傾斜する映像 (とモーションベースによる傾斜) が提示されるので、体感でどれほど傾いたか答えてもらう。

提示する刺激は「グラビティ・パラドックス」で使用した館内の映像をアレンジしたもの (図 3) で、実験者の合図があると一定の角度で前または後ろに傾く。刺激には、映像とともに (映像と同じ向きに) モーションベースが傾くものと傾かないものがある。刺激が提示された後、(モーションベースが傾いた場合は戻り、) 被験者が HMD を外し、体感で傾いた角度を答える。

映像が傾く角度は、前・後ろそれぞれ、0 度、15 度、30 度、45 度、60 度、75 度、90 度の 7 とおりである。これにモーションベースが (映像と同じ向きに約 8 度) 傾くか傾かないかの刺激がある。計 27 とおり (映像もモーションベースも傾かない試行は 1 つにまとめている) の刺激が被験者に提示さ

表 1：実験で採取するデータ

		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
前方 傾斜	あり							
	なし							
後方 傾斜	あり							
	なし							

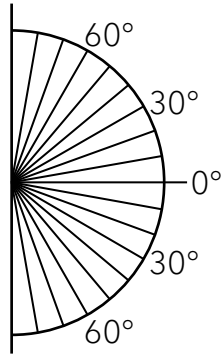


図 4：回答に用いた体感で傾いた角度を記入する様式

れる。順序効果が生じないように、被験者ごとに刺激の順序はランダムに変えてある。すなわち、各被験者について、表 1 の空欄を体感した傾きの角度で埋める形で 27 試行を実施する。

被験者が体感で傾いた角度を回答するにあたり、角度を数値で答えるのは困難と考え、図 4 のような図形を印刷した回答用紙を用意し、傾いた角度にあたる円周上に×印をつけてもらっている。

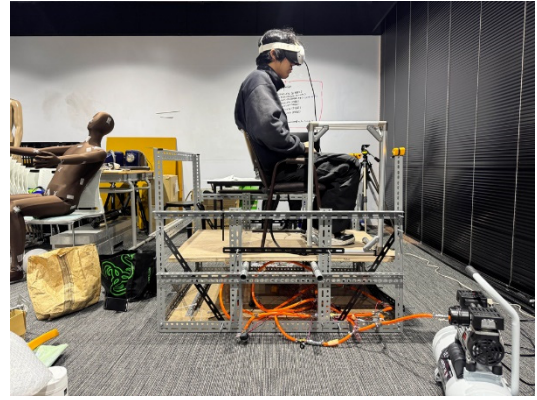
被験者は、18 歳から 21 歳の 20 名であった。うち、男性は 19 名、女性は 1 名である。実験のようすは図 5 である。

4.3. 実験の結果

4.3.1. 前方に傾けた場合

まず、映像・モーションベースが前方に傾く場合についてまとめる。図 6 が、モーションベースも傾けた場合、図 7 は、モーションベースを傾けない場合の実験結果である。いずれも、グラフ内のマーカが被験者が回答した体感での傾き、折れ線がそれぞれの映像の傾きに対する回答の平均、エラーバーはそれぞれの平均に対する標準偏差を表している（以降も同様）。正の値が前方の傾き、負の値が後方の傾きを表している。

比較すると、平均的に、モーションベースで傾斜を提示したほうが、傾斜を大きく感じている傾向が見て取れる。平均としては、モーションベースによる傾斜がある場合は、映像の傾斜が 60 度になるまで体感の傾斜が大きくなっていき、それ以降はほぼ 60 度前後で横ばいになる（標準偏差も大きくは変わらない）。モーションベースによる傾斜がない場合は、体感の傾斜は比較して全体的に小さく、映像の傾斜が大きくなるにつれて大きくなっていく。ただし、標準偏差も映像の傾斜が大きくなるにつれて大きくなっていく。



(a) 傾きを提示する前



(b) 前方に傾きを提示

図 5：実験のようす

図 6 と図 7 のデータについて二元配置分散分析を実施したところ、モーションベースによる傾斜の有無について $p = 5.03 \times 10^{-25}$ で有意差が見られた。また、映像で提示した傾斜角度について $p = 1.16 \times 10^{-7}$ で有意差が見られた。映像で提示した角度と、モーションベースによる傾斜の有無の間で交互作用は見られなかった ($p = 0.216$)。

被験者ごとのデータを見てみると、同じ被験者でも、映像の角度が大きくなったとき、一貫して体感の傾きが大きくなっていない場合がある。また、少数であるが、傾斜させた向きと逆向きの角度を回答した者がいる。これに関しては 4.4 節で議論する。

4.3.2. 後方に傾けた場合

映像・モーションベースが後方に傾く場合についてまとめる。図 8 は、モーションベースも傾けた場合、図 9 は、モーションベースを傾けない場合の実験結果である。

これも、比較すると、モーションベースで傾斜を提示した方が、傾斜を大きく感じていることが見て取れる。これも、平均としては、モーションベースによる傾斜がある場合は、映像の傾斜が 60 度になるまで体感の傾斜が大きくなっていき、それ以降は体感 50 度強で横ばいになる。これも、モーションベースによる傾斜がない場合は、体感の傾斜は小さい。だが、映像の傾斜が 45 度以上になると体感 20 度強で横ばいになる。標準偏差は大きくなっていく。

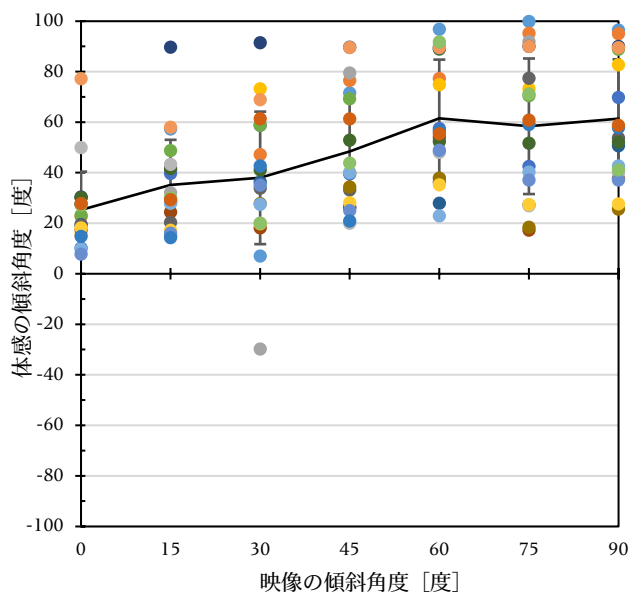


図 6：映像の傾きの角度と体感の傾き角度の関係
(前方、モーションベースによる傾斜あり)

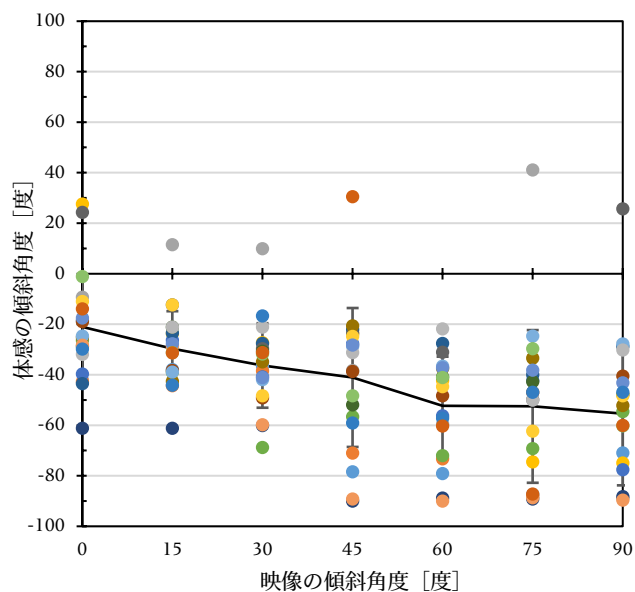


図 8：映像の傾きの角度と体感の傾き角度の関係
(後方、モーションベースによる傾斜あり)

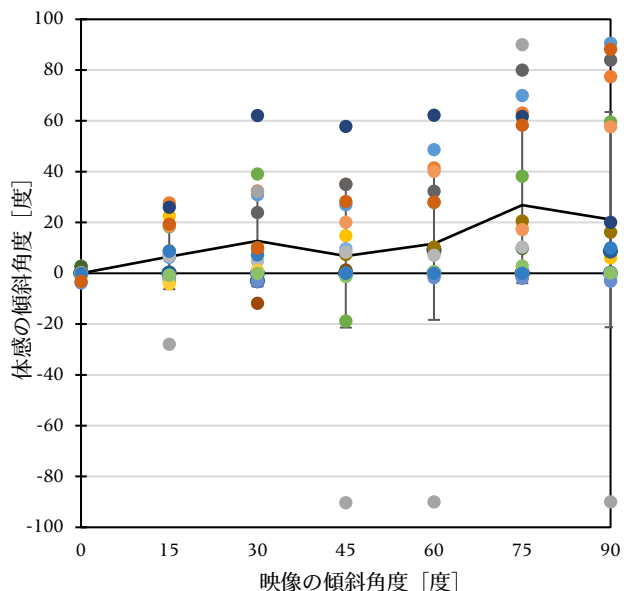


図 7：映像の傾きの角度と体感の傾き角度の関係
(前方、モーションベースによる傾斜なし)

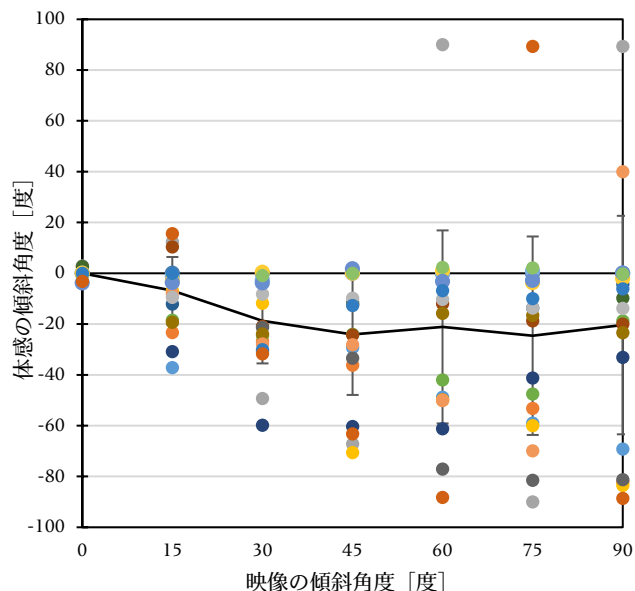


図 9：映像の傾きの角度と体感の傾き角度の関係
(後方、モーションベースによる傾斜なし)

図 8 と図 9 のデータについて二元配置分散分析を実施したところ、モーションベースによる傾斜の有無について $p=3.17 \times 10^{-13}$ で有意差が見られた。また、映像で提示した傾斜角度について $p=2.24 \times 10^{-6}$ で有意差が見られた。映像で提示した角度と、モーションベースによる傾斜の有無の間で交互作用は見られなかった ($p=0.660$)。

この場合も、被験者ごとのデータを見てみると、同じ被験者でも、映像の角度が大きくなったとき、一貫して体感の傾きが大きくなっていない場合がある。また、少数であるが、傾斜させた向きと逆向きの角度を回答した者がいる（前方への傾きを提示したときより多い）。

4.4. 結果に対する考察

総じて、前方への傾斜を提示する場合も、後方への傾斜を提示する場合も、モーションベースによる傾斜がある場合の方が映像で提示された傾斜をより大きく体感した。これは、モーションベースを利用したこと、「グラビティ・パラドックス」で企図した効果が実現できたことを意味している。「グラビティ・パラドックス」内では、重力は 1 回で 90 度（前または後ろに）変化する設定であったので、体験者は、平均的に、前方に重力が変化する演出を 60 度程度の傾斜に、後方に重力が変化する演出を 50 度強の傾斜に、それぞれ感じていたことになる。

個々のデータを見ると、提示した傾斜と逆向きの角度を回答している被験者がいた。これは、文献[11]で報告されている、「身体傾斜と逆方向に傾斜していく映像を提示すると自身がより傾いたように感じる」傾向の被験者であることが推測される。また、個々の被験者について見ると、必ずしも映像の傾きが大きいほど体感した傾きが大きいとは限らない。これは、刺激を提示した順序が関係していると考えられる。実験では、提示した刺激の順序はランダムであった。このことと、文献[12]で報告されている、映像の傾き提示に対して「増加方向の変化に気づきにくい」者と「減少方向の変化に気づきにくい」者がいることを考え合わせると、その前に提示された刺激での傾きによって、提示された刺激の傾きを大きめに感じたり小さめに感じたりするものと考えられる。

まとめると、モーションベースによる傾斜を加えると、映像による傾斜の提示（「グラビティ・パラドックス」においては重力変化の提示）は、映像のみより総じて体験者に大きく感じられることが実証できた。これは、筆者らが「グラビティ・パラドックス」に装備したモーションベースによる傾斜の演出が有効に機能したことを示している。一方で、先行研究と実験結果から、すべての人が同じように身体への傾斜と映像での傾斜で体感の傾斜が大きくなるわけではないこともわかった。これは、一般に体験者に同じ演出を提供するコンテンツにおいては、個人の特性によって適した演出に変更する対応が考えられるが、現実には難しいことである。また、映像の傾きの提示順序も体感の傾きに関係することが先行研究と実験結果から示唆されている。「グラビティ・パラドックス」では映像の傾きは一律で 90 度であるため影響は小さいが、さまざまな傾斜を提示するコンテンツにおいては留意が必要な事項であるといえる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、IVRC 2024 参加作品「グラビティ・パラドックス」について、その特徴的な演出の一つである「映像の傾き提示に合わせてモーションベースで傾斜を提示する」効果について実験的に調査した。これは、コンテンツにおいて、体験者が乗ったビークルがその超科学的な機能で重力を変化させる演出である。

実験の結果、モーションベースによる約 8 度の傾斜がある場合、映像のみで傾斜を提示した場合より総じて傾きを大きく感じる事がわかった。これは、前方への傾斜、後方への傾斜いずれも同じ傾向であった。モーションベースによる傾斜がある場合、映像が 60 度以上傾いても体感の傾きは前方への傾斜では 60 度程度、後方への傾斜では 50 度強で頭打ちになった。

今後の課題として、本実験の結果を活かしたコンテンツの改良が挙げられる。「グラビティ・パラドックス」は今後も展示の機会があるので、より楽しめる体験を提供したい。また、

製作した装置は VR における傾きと映像の関係の実験に活用できる。これについても可能性を探っていきたい。

謝辞 IVRC 2024 出展作品「グラビティ・パラドックス」の開発と制作に携わった、工学院大学 大塚広太氏、山下朋也氏、橋本一輝氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 大塚, 山下, 内野, 竹島, 宮島, 松岡, 小倉, 大谷: グラビティ・パラドックス, 第 29 回 VR 学会大会, IVRC-11, 2024.
- [2] D. Stewart: A Platform with Six Degrees of Freedom, Proc. of the Inst. of Mechanical Engineers, Vol. 180, No. 1, pp. 371–386, 1965.
- [3] P. Miermeister, M. Lächele, R. Boss, C. Masone, C. Schenk, and J. Tesch: The CableRobot Simulator Large Scale Motion Platform Based on Cable Robot Technology, IEEE IROS 2016, pp. 3024–3029, 2016.
- [4] S. Hindlekar, V. B. Zordan, E. E. Smith, J. C. Welter, and W. G. Mckay: MechVR: Interactive VR Motion Simulation of “Mech” Biped Robot, SIGGRAPH '16 VR Village, Article 14, 2016.
- [5] E. P. B. Bambalan, C. M. C. Birtanico, E. L. T. Francisco, A. C. A. Riano, and R. E. Tolentino: Application of Optical Flow in Determining Movements for Realistic Roller Coaster Ride Using a 360° Video and Two Degrees of Freedom Motion Chair, IEEE ICOEI 2020, pp. 242–247, 2020.
- [6] 森田, 船引, 竹内, 坂野, 佐々木, 西川, 森寄: めい迷路ろ, 第 28 回 VR 学会大会, IVRC-08, 2023.
- [7] T. Hachisu, M. Koge, and H. Kajimoto: VisuaLiftStudio: Using an Elevator as a Motion Platform by Modulating Perceived Direction with a Visual Illusion, TVRSJ, Vol. 23, No. 3, pp. 81–90, 2018.
- [8] 斎藤, 中西: 垂直方向の加速度の知覚強度を増幅する錯視技法, 情処論, Vol. 63, No. 2, pp. 437–445, 2022.
- [9] R. Kodama, M. Koge, S. Taguchi, and H. Kajimoto: COMS-VR: Mobile Virtual Reality Entertainment System Using Electric Car and Head-mounted Display, IEEE 3DUI, pp. 130–133, 2017.
- [10] 綿世, 渡邊, 山下, 眞鍋, 新崎: Imaginary-Slope: 視覚映像・振動刺激による VR 空間における傾斜再現手法の提案, EC2022, pp. 151–152, 2022.
- [11] 橋本, 古賀, 石津, 橋口, 田村, 柴田, 木村: 没入型映像空間における傾き知覚の分析(3) ～身体の傾きが与える影響について～, 情処全大, 1Y-08, pp. 4-415–4-416, 2018.
- [12] 沼崎, 兼松, 遠藤, 近藤, 三上: ライド型 VR コンテンツにおける呈示映像の傾きの増幅と減衰による体験者の認知に関する研究, 情処研報, Vol. 2019-DCC-23, No. 17, 2019.
- [13] 伊藤, 斎藤, 中西: AmplifiedCoaster: 移動型スロープによる HMD と電動車椅子で構成した VR ライドの上昇・下降感覚の増幅における知覚閾値調査, VR 論, Vol. 28, No. 1, pp. 55–64, 2023.
- [14] 畑瀬, 石原: 没入型運転シミュレーションにおける身体の傾きを模した映像傾斜が運転体験に与える影響, 2023 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 06-2P-02, p. 377, 2023.