

SKY HIGH!!! : 腹臥位における傾斜錯覚を利用した VR 飛行体験

新美 秀人^{*1} 花光 天朗^{*1} 中野 剛^{*1} 吉田 悠誠^{*1}
渡部 綾一^{*2} 森田 磨里絵^{*2,*3} 橋口 哲志^{*4}
柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

SKY HIGH!!!: A VR Flight Experience Using Tilt Illusion in a Prone Posture

Hideto Niimi^{*1} Tenro Hanamitsu^{*1} Go Nakano^{*1} Yusei Yoshida^{*1}
Ryoichi Watanabe^{*2} Marie M. Morita^{*2,*3} Satoshi Hashiguchi^{*4}
Fumihisa Shibata^{*1} Asako Kimura^{*1}

Abstract — 本研究では、腹臥位における傾斜錯覚を利用した VR 飛行体験システムを構築した。体験者は腹臥位でバランスボードに乗り、体幹の重心移動によって機体の前後姿勢を操作する。本システムでは、身体の物理的な傾きに対して VR 空間内の機体傾斜を誇張して提示することで、実際の身体傾斜以上の傾きを知覚させることを試みる。これにより、わずかな身体傾斜でも大きく傾いて飛行しているような感覚を生じさせ、腹臥位における傾斜錯覚を利用した飛行体験を提供する。本展示発表では、身体傾斜と視覚的な機体傾斜との対応関係を変化させた、傾斜錯覚を利用した飛行体験のデモを行う。

Keywords : Virtual Reality, Flight Experience, Tilt Illusion, Prone Posture, Motion Perception

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) は、現実には容易に行えない空中飛行を疑似的に体験する手段として利用されている。このような VR 飛行体験では、視覚情報に加えて、体験者の身体姿勢や身体運動を飛行中の感覚と対応付ける試みが行われている。Rheiner は、体験者が装置上で腹臥位となり、腕の動きによる操作と風などの多感覚刺激を通して鳥の飛行を体験するシステム Birdly を提案した^[1]。また、Mashal らは、腕の動作を飛行に対応付けた VR 環境を構築して評価し、プレゼンス、アバタ身体化、および翼の身体所有感の 7 件法による評価の平均値がそれぞれ 5.5, 5.0, 5.4 であり、いずれも比較的高い評価を得たことを報告した^[2]。これらの研究から、VR 飛行体験において、飛行に対応する身体姿勢や身体運動を操作入力や感覚提示に取り入れることは、プレゼンスや身体所有感を伴う体験の設計に有用であることが

示唆される。

一方、VR 飛行体験において、機体の大きな傾斜に合わせて体験者の身体を同程度に傾ける場合、安全性や装置構成上の制約が生じる。そこで、実空間での身体傾斜を小さく抑えながら VR 空間内で大きな機体傾斜を提示するためには、身体傾斜と視覚的な機体傾斜との対応関係を操作する必要がある。Scotto Di Cesare らは、身体が前後に傾くピッチ方向において、実空間での身体傾斜と同方向に視覚シーンを傾けることで、実際の身体傾斜を知覚しやすくなることを示した^[3]。また、Keppel らは、VR サイクリングにおいて、物理傾斜よりも大きな仮想傾斜であっても、一定範囲では両者が知覚的に対応することを示した^[4]。Maeno らは、物理的な床傾斜に対して VR 空間内のボード傾斜を視覚的に誇張する床傾斜錯覚を利用し、実際以上の傾斜感の提示を試みる VR ウィンドサーフィンシステム Wobbly! VR Windsurfing を提案している^[5]。

しかし、腹臥位における能動的な前後方向の身体傾斜と視覚的な機体傾斜の誇張とを組み合わせた飛行体験については、十分に検討されていない。前述の Birdly に見られるように、腹臥位は鳥として飛行する VR 体験における身体姿勢として用いられている。また、身体姿勢は VR における視覚的な自己運動知覚にも影響する。McManus と Harris は、腹臥位や仰臥位において、視覚環境による自己の向きの解釈が視覚的

*1: 立命館大学 情報理工学部

*2: 立命館大学 OIC 総合研究機構

*3: 大阪工業大学 情報科学部

*4: 立命館大学 デザイン・アート学部

*1: College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

*2: Research Organization of Open Innovation and Collaboration, Ritsumeikan University

*3: Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology

*4: College of Arts and Design, Ritsumeikan University

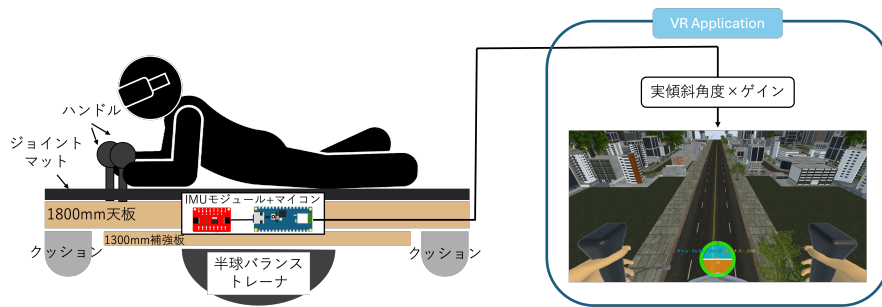


図1 バランスボードデバイスと VR アプリケーションの構成。
Fig.1 Configuration of the Balance Board Device and VR Application.

な自己運動知覚に影響することを示した^[6]。これらの知見から、腹臥位での能動的な身体傾斜に対して視覚的な機体傾斜を誇張して提示することで、身体姿勢と視覚情報を対応付けた飛行体験を構成できると考えた。

そこで本研究では、腹臥位における傾斜錯覚を利用した VR 飛行体験システムを構築した。体験者はバランスボードデバイス上に腹臥位で搭乗して HMD を装着し、体幹の重心を前後方向に移動させて天板を傾けることで、VR 空間内の機体の前後姿勢を操作する(図1)。本システムでは、身体の物理的な傾きよりも VR 空間内の機体を大きく傾けて視覚的に提示することで、実際の身体傾斜以上の傾きを知覚させることを試みる。本展示発表では、身体傾斜と視覚的な機体傾斜との対応関係を段階的に変化させた VR 飛行体験のデモを行う。

2. 傾斜錯覚を利用した腹臥位での VR 飛行体験システム

バランスボードデバイスと VR アプリケーションの構成を図1に示す。本システムは、体験者の体幹の重心移動に伴う天板の傾斜を取得するバランスボードデバイスと、取得した傾きにゲインを適用して VR 空間内の機体傾斜に反映する VR 環境から構成され、両者は WebSocket を介して通信する。

2.1 バランスボードデバイス

バランスボードデバイスは、体験者が腹臥位で搭乗し、体幹の重心を前後方向に移動させて天板を傾けることで、VR 空間内の機体の前後姿勢を操作する装置である(図2)。腹臥位は、体験者の身体の向きと VR 空間内の飛行方向を対応付けるために採用した。

本デバイスは、天板(パーティ集成材、直径1800mm、厚さ30mm)、補強板(パイン集成材、1300mm角、厚さ24mm、八角形に加工)、半球状のバランストレーナ(BOSU Fitness 社 BOSU バランストレーナー プロ NexGen、直径65cm、耐荷重159kg)、9軸の慣性計測装置(Inertial Measurement Unit: IMU)である BNO086 を搭載したモジュール(SparkFun 社 Spark-



図2 バランスボードデバイスに搭乗する体験者。
Fig.2 Participant on the Balance Board Device.

Fun VR IMU Breakout, Qwiic)、およびマイクロコントローラ(Arduino Nano ESP32)から構成される。天板の下に補強板を重ねてボルトとナットで固定し、補強板の下部にバランストレーナを設置して、これを支点として天板が傾斜する構造とした。また、腹臥位で搭乗する体験者の身体的負担を軽減するため、天板上面にジョイントマットを敷設した。

天板の傾斜は前後方向にのみ生じるよう構成した。天板の左右および前後には、発泡ポリスチレン製部材を固定した。左右の部材によって左右方向の動きを抑制し、前後の部材によって傾斜範囲を水平から前後それぞれ最大約4度に制限した。最大約4度は、当初設定した最大約7度では、装置外から見た天板の物理的な傾斜が大きく見えたため、試作段階で傾斜範囲を縮小して設定した値である。また、前後の部材の接地面にはポリウレタン製クッションを貼り付け、床面との接触時に生じる衝撃を緩和した。前後方向に限定したのは、本研究が前後方向の傾斜錯覚を対象とするためである。

天板の傾きは、IMU を用いてクォータニオンとして取得し、マイクロコントローラから VR 環境へ送信

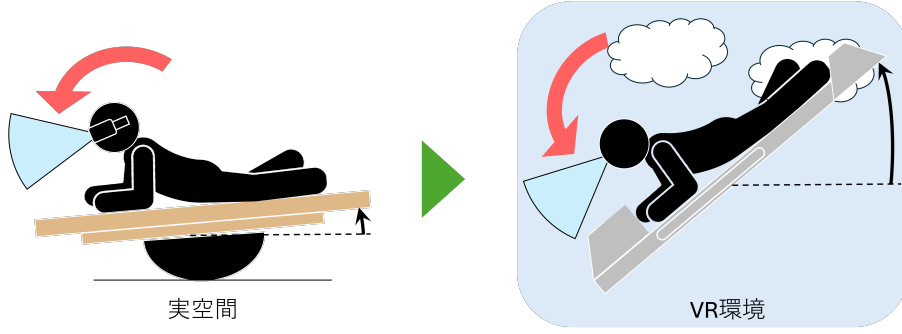


図3 傾斜錯覚の概念図。
Fig. 3 Concept of Tilt Illusion.

する。送信された天板の傾きは、次節で述べる視覚的な誇張に用いられる。

2.2 傾きの視覚的誇張とゲイン操作

本システムでは、実空間における身体傾斜に対して、VR空間内の機体をより大きく傾けて提示する(図3)。体験者の体幹の重心移動によって天板が傾くと、IMUで取得した天板の物理的な傾斜角にゲインを乗じ、VR空間内の機体のピッチ角として反映する。このとき、天板の物理的な傾斜角とVR空間で提示する機体のピッチ角との関係は(1)式で表される。

$$\theta_v = G \cdot \theta_p \quad (1)$$

ここで、 θ_p は実空間における天板の傾斜角、 θ_v はVR空間で提示する機体のピッチ角、 G は傾斜誇張ゲインである。このように身体傾斜と視覚的な機体傾斜との対応関係に差を生じさせることで、実際の身体傾斜以上の傾きを知覚させることを試みる。

本システムでは、ゲイン G を1倍、5倍、10倍、15倍、20倍の5段階に設定した。天板が水平から4度傾いた場合、VR空間では機体がそれぞれ4度、20度、40度、60度、80度に傾く。飛行コース上にはチェックポイントを設け、体験者が通過するたびにゲインを1段階ずつ増加させる。天板の傾斜角が4度の場合に、ゲイン $G = 1$ および $G = 10$ で体験者に提示されるVR画面を図4に示す。これにより、体験者は飛行を中断することなく、身体傾斜と視覚的な機体傾斜との対応関係の違いを段階的に体験できる。ゲインの切替時には、切替前の値から切替後の値へ徐々に変化させることで、急激な視界変化を抑える。

2.3 VR環境

VR環境はUnity (Version 2022.3.52f1)を用いて構築し、HMD (Meta Quest 3)を用いて、機体に搭乗して空を飛行する一人称視点の映像を体験者に提示する。バランスボードデバイスのマイクロコントローラから約100Hzで送られるクォータニオンを受信し、

機体の前後姿勢に反映する。

機体の挙動には、機体のピッチ角に応じて速度が変化する簡易な飛行モデルを用いた。機体のピッチ角を α 、速度を v とする。各更新ステップ(時間間隔 Δt)では、まず機体のピッチ角に応じて速度を増減させる。機体が下を向く($\alpha > 0$)と加速し、上を向く($\alpha \leq 0$)と減速する。

$$v \leftarrow \begin{cases} v + \frac{\alpha}{90} a_d \Delta t & (\alpha > 0) \\ v - \frac{|\alpha|}{90} a_u \Delta t & (\alpha \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

次に、空気抵抗を模した補正により、速度を基準速度 v_0 へ近づける。

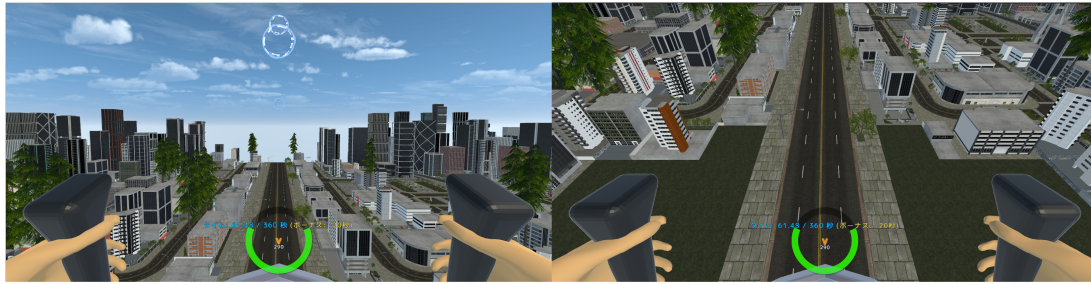
$$v \leftarrow v + (v_0 - v)c\Delta t \quad (3)$$

最後に、速度を最小値 $v_{\min}$ から最大値 $v_{\max}$ の範囲に制限する。

$$v \leftarrow \text{clamp}(v, v_{\min}, v_{\max}) \quad (4)$$

ここで、 a_d は加速係数、 a_u は減速係数、 c は空気抵抗係数、 v_0 は基準速度である。本システムでは、開始時の速度を150とし、 $v_0 = v_{\min} = 100$ 、 $v_{\max} = 400$ 、 $a_d = 200$ 、 $a_u = 130$ 、 $c = 4$ とした。これらの値はVR空間内で用いるパラメータであり、試作段階でシステムの動作を確認しながら調整した。なお、 α にはゲイン適用後の機体のピッチ角を用いるため、ゲインが大きい段階ほど、同じ身体傾斜に対する速度変化も大きくなる。これにより、機体のピッチ角に応じた速度変化を提示し、飛行感を高めることを狙う。

地形への衝突時には、急激な視界変化を抑えるため、画面をフェードアウトさせ、カウントダウン表示の後にコース上へ復帰させる。このとき、機体の速度は開始時の値である150にリセットする。



実傾斜 (4度)

誇張傾斜 (40度)

図4 天板の傾斜角が4度の場合に、異なるゲインで提示されるVR画面。

Fig.4 VR Views with Different Gains at a Board Tilt of 4 Degrees.

3. 展示

本展示では、前章で述べたVR飛行体験システムを展示する。体験者は、バランスボードデバイス上に腹臥位で搭乗し、体幹の重心を前後方向に移動させて天板を傾けることで、VR空間内の機体の前後姿勢を操作する。体験者は、飛行コース上に配置されたチェックポイントを通過しながらゴールを目指す。

体験者は、まず本体験に関する注意事項と操作方法について説明を受ける。その後、スタッフの補助を受けながらバランスボードデバイス上に搭乗し、HMDを装着する。腹臥位での搭乗を伴うため、搭乗時および降機時にはスタッフが補助を行い、気分不良や姿勢の崩れが生じた場合には体験を中断する。準備完了後、体験者は約3分間の飛行体験を行う。

体験中は、チェックポイントを通過するたびに、身体傾斜に対する視覚的な機体傾斜のゲインが1段階ずつ増加する。これにより、体験者は飛行を中断することなく、身体傾斜と視覚的な機体傾斜との対応関係の変化を段階的に体験できる。また、体験後には、ゲイン変化に伴う傾斜感、飛行感、操作のしやすさ、およびVR酔いについて任意で感想を尋ね、今後の評価項目を検討する際の参考とする。

4. まとめ

本稿では、腹臥位における傾斜錯覚を利用したVR飛行体験システムを構築した。本システムでは、体験者が腹臥位でバランスボードデバイスに搭乗し、体幹の重心を前後方向に移動させて天板を傾けることで、VR空間内の機体の前後姿勢を操作する。身体の物理的な傾きよりもVR空間内の機体を大きく傾けて視覚的に提示することで、わずかな身体傾斜でも実際以上に大きく傾いて飛行しているような感覚の提示を目指す。

本展示発表では、身体傾斜と視覚的な機体傾斜との対応関係を段階的に変化させたVR飛行体験のデモを行う。体験者は、飛行を中断することなく、チェックポイントを通過するたびに異なるゲインによる機体傾斜を段階的に体験できる。今後は、機体の速度を一定とする条件を設けることで速度変化の影響を統制し、ゲインの違いが主観的な傾斜知覚、飛行感、およびVR酔いに与える影響を定量的に評価する。

参考文献

- [1] Rheiner, M.: Birdly an Attempt to Fly; ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, pp. 1–1 (2014).
- [2] Mashal, S., Kranz, M., Hoelzl, G.: Do You Feel Like Flying? A Study of Flying Perception in Virtual Reality for Future Game Development; IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 40, No. 4, pp. 51–61 (2020).
- [3] Scotto Di Cesare, C., Buloup, F., Mestre, D.R., Bringoux, L.: How Do Visual and Postural Cues Combine for Self-Tilt Perception During Slow Pitch Rotations?; Acta Psychologica, Vol. 153, pp. 51–59 (2014).
- [4] Keppel, J., Prochazka, M., Lewin, S., Stroehnis, M., Strauss, M., Zenner, A., Degraen, D., Matvienko, A., Schneegass, S.: Determining Perception Thresholds for Real and Virtual Inclinations While Cycling in Virtual Reality; Proceedings of the 2026 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1–18 (2026).
- [5] Maeno, Y., Kariyazono, J., Watanabe, I., Konishi, M., Shichijo, Y., Nishii, D., Morita, M.M., Hashiguchi, S., Nakamura, F., Shibata, F., Kimura, A.: Wobbly! VR Windsurfing: Enhancing Motion Perception via Floor-Tilt Illusion; Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2026, pp. 778–780 (2026).
- [6] McManus, M., Harris, L.R.: When Gravity Is Not Where It Should Be: How Perceived Orientation Affects Visual Self-Motion Processing; PLOS ONE, Vol. 16, No. 1, e0243381 (2021).