

ぐらぐら！VRウィンドサーフィン： 床傾斜錯覚によるウィンドサーフィン体験

仮屋 蘭 純^{*1} 前野 佑太朗^{*1} 渡邊 出琉^{*1} 小西 真結^{*1}
近藤 孝宣^{*1} 西井 大樹^{*1} 森田 磨里絵^{*1} 橋口 哲志^{*2}
中村 文彦^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Wobbly! VR Windsurfing: Windsurfing Experience with a Floor-Tilting Device

Jun Kariyazono^{*1} Yutaro Maeno^{*1} Izuru Watanabe^{*1} Mayu Konishi^{*1}
Yamato Shichijo^{*1} Daiki Nishii^{*1} Marie Morita^{*1} Satoshi Hashiguchi^{*2}
Fumihiko Nakamura^{*1} Fumihisa Shibata^{*1} Asako Kimura^{*1}

Abstract – Windsurfing is a water sport that involves standing on a board with a sail, where the rider controls the sail to navigate using the wind. To enable windsurfing without access to water, virtual reality (VR) applications have been developed. However, simulating the windsurfing experience with high fidelity has difficulties in replicating realistic physical sensation. This paper proposes a VR windsurfing system that leverages floor-tilt illusion. By visually exaggerating the tilt angle of the floor compared to the physical tilt, a person experiences an enhanced sensation of inclination, thereby reinforcing the motion perception. Our system incorporated a floor-tilting device that synchronizes with the virtual windsurfing board's motion to induce this illusion. Additionally, the user can control the virtual sail by applying lateral force to a handle connected to a sensing device to measure the pulling force. With floor-tilting device and pulling force measurement device, our system enables the user to navigate a virtual ocean environment by steering the sail and experiencing tilt sensation enhanced by tilt illusion. In the demonstration, participants experiences VR surfing with our system and aim to go to a goal by controlling a ceil with feeling augmented tilt sensation.

Keywords : Virtual Reality, Windsurfing, Tilt Illusion, Pulling Force

1. はじめに

ウィンドサーフィンは帆(セール)が取り付けられたボードを用いて、風を受けながら水面を滑走するスポーツであり、ウィンドサーファーは風の方向に応じてセールの角度を調整しながら、多様に变化する水面上を走る。ウィンドサーフィンは川や海などの水域で行われるが、バーチャルリアリティ(Virtual Reality: VR)を活用したシミュレータも開発されている^{[1],[2]}。既存のシミュレータでは、ヘッドマウントディスプレイ(Head-Mounted Display: HMD)を介して提示されるウィンドサーフィン中の映像と、その映像に対応した物理的なボードの傾斜を通した身体感覚への刺激を提示することで、臨場感の高い体験を提供している。しかし、実際の波の動きによって生じるボードの傾斜を忠実に再現するためには、高応答・高出力なア

クチュエータが必須であり、装置の大型化と高コスト化を招く。

そのような物理的な課題を解決するアプローチとして、我々は人間の知覚特性に着目した。実際の傾斜よりも緩やかな傾斜であっても視覚刺激を組み合わせることで傾斜感覚の錯覚が誘発されることが知られている。VR環境で、ユーザが杖を用いて壁や床にかけた負荷に応じて部屋のCGモデルを回転させ、ユーザの身体による入力と視覚情報を連動させることで主観的な傾斜感覚を誘発できることが報告されている^[3]。また、HMDユーザがトランポリン上で移動した時のトランポリンの変形からVR空間での傾斜角度を誇張し提示しても臨場感を感じることが示されている^[4]。上記の先行研究から、人間が物理的な刺激と視覚情報を統合する際、特に視覚による影響を受けやすい特性があることが示されている。そのため、物理的な傾斜を増幅した映像を提示することで、実際の傾斜角よりも大きい傾斜角度を錯覚する体験が可能であることが示唆されている。

そこで、本研究では、傾斜の錯覚を利用したサーフィン感覚を提示するシステムを提案する。本研究では、

*1: 立命館大学 情報理工学部 情報理工学科

*2: 立命館大学 グローバル・イノベーション研究機構

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

*2: Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

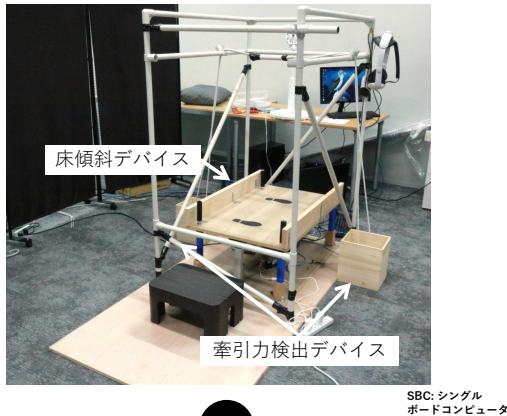


図1 本研究で開発したデバイス。(上) デバイス
外観。(下) システム構成。

Fig.1 Our Device. (Top) Device Overview.
(Bottom) System Configuration.

VR 空間での海面の傾斜と同期した床面の傾斜の変化を提示することで、傾斜錯覚を引き起こし、VR 空間でのサーフィン体験を提供する。

2. 床傾斜錯覚によるウィンドサーフィン体験システム

我々は VR ウィンドサーフィン体験において傾斜錯覚を誘発するシステムを開発した (図1)。本システムは、VR 空間のボードの傾きの運動に応じて、実空間のユーザが立っている床の傾斜を変化させた。本システムは、床傾斜デバイス、牽引力検出デバイス、VR 環境から構成される。床傾斜デバイスとハンドルデバイスはそれぞれ VR 環境とのネットワークを介した通信を行った。

2.1 床傾斜デバイス

床傾斜デバイスは、天板をアクチュエータを用いて駆動させることで、ウィンドサーフィン体験時のユーザが立っている床面の傾斜を提示した。本デバイスは、2 個のリニアアクチュエータによって、天板の両端の高さを変化させることで、天板の傾斜を制御した (図2)。

床傾斜デバイスは、2 個のリニアアクチュエータ (Pololu Glideforce MD122006 Medium-Duty Linear Actuator)、シングルボードコンピュータ (Rasp-

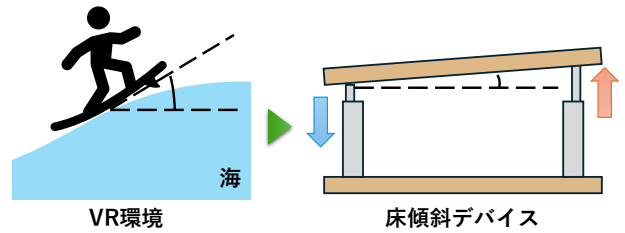


図2 床傾斜錯覚の原理。(左) VR 空間でのボードの傾斜。(右) 床傾斜デバイスでの床の傾斜。

Fig.2 Principle of Floor Tilting Illusion.
(Left) Board Tilt in Virtual Space.
(Right) Floor Tilt Presented by Our Floor Tilting Device.

berry Pi 4 Model B)、モータドライバ (Motoron M2H18V18 Raspberry Pi 用デュアルハイパワーモーターコントローラキット)、4 個のバネ (長さ 200mm, 外径 40mm, ばね定数 26.4 N/mm)、2 つの天板 (600mm × 900mm × 210mm)、4 本の天板接続用のステンレスパイプ (外径 45mm)、安全柵を用いて作成した。一方の天板の 4 隅に木片に取り付けた天板接続用のパイプとバネを取り付け、天板の両側の短辺中央にはリニアアクチュエータを取り付けた。もう一方の天板には 4 隅に穴を開け、別の天板のパイプを通し、リニアアクチュエータの駆動部分の先端が 4.0cm のゴム板を挟んで天板と接触するように設置した。これは、ユーザが天板上に乗った時に、リニアアクチュエータだけでなくバネの反力も活用して板を駆動できるようにするためである。また、ユーザの安全性を確保するために、安全柵をデバイス周辺に設置した。

2 個のリニアアクチュエータはモータドライバを介してシングルボードコンピュータによって制御された。リニアアクチュエータには 12V のスイッチング電源 (TDK RWS150B-12) によって電力を供給した。シングルボードコンピュータは VR 環境が動作しているコンピュータとネットワークを介して通信した。シングルボードコンピュータは VR 環境から受信した前フレームの傾斜角の差分をリニアアクチュエータの伸縮速度に変換することで、アクチュエータの伸縮を制御した。

2.2 牽引力検出デバイス

牽引力検出デバイスは、ウィンドサーフィン体験時のユーザの左右方向への牽引力を計測した。本デバイスは、2 個の重量計測部にかかる重量を計測することで、ユーザが把持部を牽引する力を検出した (図3)。例えば、ユーザが把持部を右に引っ張った時には、伸縮性ロープを通して左側の重量計測部の重りが持ち上げられ、左側の検出部の力センサにかかる重量が軽く

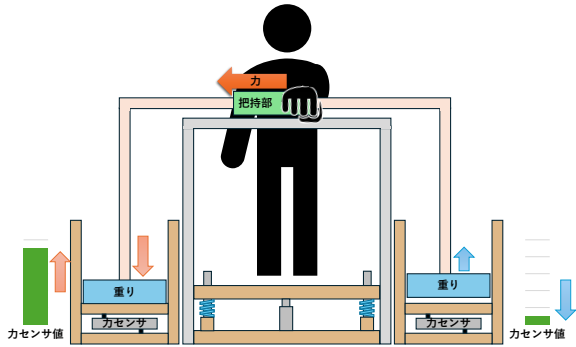


図3 牽引力計測デバイスの原理.

Fig.3 Principle of Pulling Force Measurement Device.

なる. この左右の重量計測部の差分から, ユーザの牽引した方向とその力を計測した.

牽引力検出デバイスは2個の重量検出部で構成され, それぞれの重量検出部が伸縮性ロープを通して接続されており, その中央部にユーザが操作時に把持するためのパイプが取り付けられた. 重量検出部の機構は先行研究^[5]の計測原理に基づき作成した. 重量検出部は, 6.0kgの重り, 力センサ(ロードセル SC133 20kg), ADコンバータモジュール(HX711 使用ロードセル用ADコンバータモジュール), シングルボードコンピュータ(Raspberry Pi 4 Model B)によって構成される. 重量計測部の外装は木板を用いて作成した. 重量計測部の底部には力センサとADコンバータを配置した. 力センサの上に木板を配置し, その上に6.0kgの重りを設置した. 重りには伸縮性ロープが取り付けられた.

各重量検出部の力センサはADコンバータモジュールを介してシングルボードコンピュータと接続された. 体験中, シングルボードコンピュータは力センサの値を取得した. シングルボードコンピュータはネットワークを介してVR環境が動作しているコンピュータと通信し, 計測した各力センサの値を送信した.

2.3 VR環境

VR環境はUnity (Version 6000.38.1)で構築し, HMD (Meta Quest 3)を介してユーザに提示された. VR環境には, 海面上にウィンドサーフィンを行うセール付きのボードが配置され, ユーザはボード上に配置された. VR環境では, 波によって海面の傾斜が生じ, それに伴って海面上にあるボードも傾いた. また, VR環境内では体験者の初期位置からゴール方向へ吹く風が生成された. これは, 風の方向を単純化することで, 幅広いユーザにとって操作が容易になるように配慮したものである.

本システムでは, ボードに多様な傾斜を発生させるために, 正弦波とパーリンノイズの合成によって多様

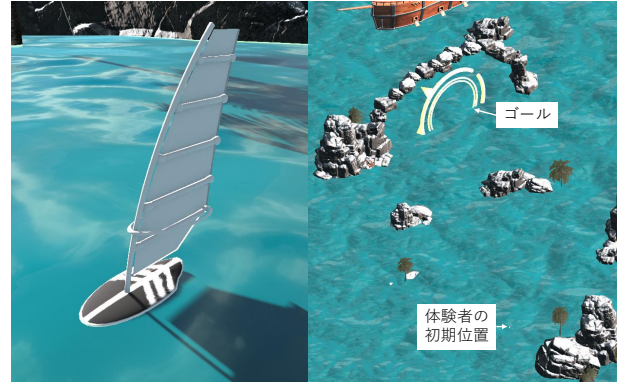


図4 VR環境. (左) ウィンドサーフィンのボード. (右) 体験者の初期位置とゴール.

Fig.4 VR environment. (Left) Windsurfing board. (Right) Initial Position of Participant and Goal.

な波を生成した. パーリンノイズとは, 疑似的なランダム性を持ちながら連続性を持つパターンを生成するアルゴリズムによって生成されたノイズである. 周期的な波にパーリンノイズを合成することで, 水面の微細な動きや不規則な運動を表現することを狙った. 本実装では, 波の振幅の最大値は10.0mとした. ボードの位置における波の傾斜によって, ボードも傾斜した. ボートの傾きは, 0.1秒ごとに計測され, 前フレームとの傾きの角度差分が床傾斜デバイスに送信された.

ボードは, セールの姿勢と風の方向を基に計算される加速度を加えられることで移動した. 風の方向とセールの姿勢がなす方位角 α と風速 v_{wind} によって, ボードに加えられる前方向への加速度 a_{long} , 左右方向への加速度 a_{lat} はそれぞれ以下の数式によって計算された.

$$a_{long} = C_{long} \cdot \sin(2\alpha) \cdot v_{wind}^2 \quad (1)$$

$$a_{lat} = C_{lat} \cdot \cos(2\alpha) \cdot v_{wind}^2 \quad (2)$$

C_{long}, C_{lat} はそれぞれ前方方向・左右方向への加速度家に与えるゲインを示す. 計算された各方向への加速度をボードに加えることで, 風の方向に対するセールの姿勢に応じたボードの移動を実現した.

3. 展示

我々は, 体験者がVR空間でウィンドサーフィンを体験するシステムを展示する. 体験者は, 牽引力検出デバイスを通してセールの姿勢を操作することで海面上を移動しながら, 錯覚を誘発する床傾斜デバイスを通して波によって生じる海面上の傾斜の変化を体験する. 本展示では, 体験者はウィンドサーフィンをしながら, 光輪として表示されているゴールを目指す(図5).



図5 VR ウィンドサーフィン体験. (左) 体験者.
(右) 体験者のビュー.

Fig. 5 VR Windsurfing Experience. (Left)
Participant. (Right) Participant's
View.

体験者は、まず、本体験に関する注意事項について説明を受ける。説明後に、体験者が床傾斜デバイス上に移動し、HMDを着用する。そして、牽引力検出デバイスによるセールの姿勢の操作による移動のチュートリアルが行われる。チュートリアル後、体験者はウィンドサーフィンによって海面上を移動し、光輪を通りながら時間内にゴールに向かう。体験時間は約2分間である。

我々は本システムを2025年5月に開催された”いばらき×立命館 DAY2025”で展示した。幅広い年齢層の来場者から高い没入感とリアルさに対する好意的なフィードバックを得た。

4. まとめ

本研究では、床面の傾斜錯覚を利用したウィンドサーフィン体験を提示するVRシステムを提案した。本システムでは、ウィンドサーフィンの進行方向を操作する把持型牽引力検出デバイスと、床面の傾斜錯覚を引き起こす床傾斜デバイスと、波と風を生成するVR環境を開発した。本システムでは、物理的なボードの傾斜に対して視覚的に誇張された映像を提示することで傾斜錯覚を誘発し、装置の物理的な稼働範囲による制約を超えた傾斜感覚の提示を実現した。さらに、把持型牽引力検出デバイスによるセールの方向制御と、床傾斜デバイスによる傾斜感覚のフィードバックを組み合わせることで、インタラクティブなウィンドサーフィン体験を実現した。

展示では、我々のシステムを使用したウィンドサーフィン体験を提供する。本展示では、体験者は指定された箇所を通りながら時間内にゴールを目指すアプリケーションを体験する。我々は本展示を立命館大学のイベントでも公開しており、幅広い年齢層の来場者から好意的なコメントを得た。

現在のシステムでは、前後方向のみの傾斜角を提示したが、左右方向への傾斜角の錯覚を誘発する拡張し、ユーザ体験の向上を図る。また、VRサーフィンにおける風や音を含むマルチモーダル刺激は臨場感や酔いを低減させると示されていること^[6]から、本システムへのマルチモーダル刺激の導入による臨場感の向上を実施する。さらに、今後、本システムによって錯覚を感じられる前後・左右の傾斜角についてユーザ実験を行う。

参考文献

- [1] Ouadahi, N., Chadli, S., Ababou, A. and Ababou, N.: A simulator Dedicated to Strengthening Exercises for Windsurfers, *Procedia Engineering*, Vol. 147, pp. 532–537 (2016). The Engineering of SPORT 11.
- [2] Goto, M., Esaki, K., Inoue, T., Seshimo, H. and Hirano, T.: An evaluation of a remote training system with bodily reliving experience for windsurfing, *Sports Engineering*, Vol. 28, No. 1, p. 17 (2025).
- [3] Motohashi, K., Mori, K. and Kodaka, K.: Room Tilt Stick, *SIGGRAPH Asia 2021 XR*, SA '21 XR, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2021).
- [4] 加藤 陸, 水野慎士, 舟橋健司: トランポリンによる足元触覚と平衡感覚を用いたVRシステムの開発, 研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN), Vol. 2023-GN-118 (2023).
- [5] Tsuji, R., Yanagisawa, S., Sakaguchi, T., Hirota, K., Otsuka, R., Nakamura, F., Shibata, F. and Kimura, A.: Interactive Virtual Fishing with Rendering Continuous Reel Weight and Line Slack, *SIGGRAPH Asia 2024 Emerging Technologies*, SA '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2024).
- [6] Banerjee, P., Cherin, J., Upadhyay, J., Finley, J., Kutch, J. and Culbertson, H.: Perception and Control of Surfing in Virtual Reality Using a 6-DoF Motion Platform, *Haptics: Understanding Touch; Technology and Systems; Applications and Interaction* (Kajimoto, H., Lopes, P., Pacchierotti, C., Basdogan, C., Gori, M., Lemaire-Semail, B. and Marchal, M., eds.), Cham, Springer Nature Switzerland, pp. 455–468 (2025).