



ウインドサーフィン シミュレータにおいて実写と CG を重畳することがスピード体感に与える影響の検討

A study of the effect of superimposing computer graphics over video on the experience of speed in a windsurfing simulator

藪内勉¹⁾, 井上照久¹⁾, 瀬下仁志¹⁾

Tsutomu YABUUCHI, Teruhisa INOUE, and Hitoshi SESHIMO

1) NTT 人間情報研究所 (〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1, tsutomu.yabuuchi@ntt.com)

概要: ウインドサーフィンは海上を高速で航走するため、指導者がそばにつくのが難しいという問題がある。そこで我々は練習を効率化するために、用具の動きと競技者の視界を再現するシミュレータを開発した。海上を航走する実写映像に CG オブジェクトを重畳することでベクション現象によってスピード体感が向上するか実験した結果を報告する。

キーワード: ウインドサーフィン, ベクション, HMD, コンピュータグラフィックス

1. はじめに

ウインドサーフィンの競技では、海上に設置されたブイを周回して順位を競う。競走に勝つためには、風の力を推進力に変え高速に航走することが重要である。近年の競技用ウインドサーフィンでは更なるスピードアップのため、フォイルと呼ばれる水中翼を伴った用具(図 1)も登場した。低速時は比重の小さいボードの浮力によって、高速航走時はフォイルが生み出す揚力によってその重量を支える。フォイルの抵抗はボードよりはるかに小さく、60km/h を超える航走が可能になった。

ボードが離水する高速航走時に艇速が速すぎるとフォイルが生み出す揚力が過大となり、海面上に飛び出し転覆してしまう危険性がある。そのため、単に高速を出し続けるのではなく、競技者が現在の艇速を正しく認識し、用具を適切に操作して速度を制御する必要がある。

常に変化する風や波などの外部環境に合わせて、ウインドサーフィンを操作する方法を言語化するのは困難である。現在は海岸から数 km 離れて航走し、陸上に戻ってから指導を受けている。指導者が競技者の状態を把握するのが難しく、リアルタイムで指示を出せないという問題がある。そこで、先行研究[1]では用具を操作する練習を効率的に行うために、ボードやセイルの角度を記録して再現し、競技者の視点の 360 度映像を HMD で再生するウインドサーフィンシミュレータ(以下、WS シミュレータ)を開発した(図 2)。指導者が直接見ることが難しかった競技者の動きを WS シミュレータの動きを通して観察し、その指

導を行うことが可能になる。

上述した WS シミュレータにおける問題点として HMD で再生する 360 度映像は、視野のほとんどを空と海が占めており、現在の艇速を知る手掛かりとなるオブジェクトが乏しい。その結果、艇速に応じて適切に用具を操作する練習に有効であるとは言い難い。

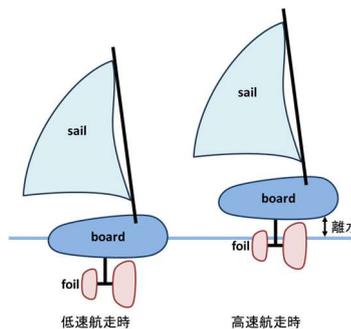


図 1: ウインドサーフィン用具の構造

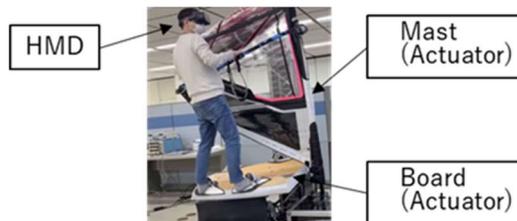


図 2: ウインドサーフィンシミュレータの概要

そこで本研究では、WS シミュレータの HMD に提示する 360 度の実写映像に対して、CG オブジェクトを重畳させ、ベクションによるスピード体感を向上させる手法を提案する。また、提案手法によるスピード体感について、8 名の実験参加者による実験を行い、体感の向上に効果があるかを確認した。

2. WS シミュレータにおけるスピード体感

2.1 WS シミュレータの概要

図 2 に示した通り、先行研究で開発した WS シミュレータは、マスト、ボード、HMD(PICO4[2])からなる。

実機の航走時はマストとボードに HAWKCAST[3]を設置して、GPS と 9 軸モーションデータを 20Hz で記録する。また競技者の頭上に垂直にアクションカメラ GoPro MAX[4]を取り付け、4K/30fps の 360 度動画を撮影する。

WS シミュレータを用いた練習時には、ボードはロール角とピッチ角、マストは根元からロール角が制御可能であり、実機のデータを再現する。また 360 度動画を HMD にて再生する。

また、図中には映っていないが、シミュレータの前方にはファンが具備され、上述した GPS のデータから求めた艇速 speed をもとに、以下の式でファンの動作電圧 V を導出して進行風を疑似的に表現している。

$$\begin{aligned} V_{air} &= 7(\text{speed} < 40\text{km/h}) \\ &= 12(40\text{km/h} < \text{speed} < 43\text{km/h}) \\ &= 16(46\text{km} < \text{speed}) \end{aligned}$$

2.2 問題点：スピード体感の再現不足

先行研究[1]において、日本ウインドサーフィン協会 (JWA) の選手 4 名が WS シミュレータを利用する評価実験を行った。その結果、本シミュレータは自身や他者の航走を体験可能であることが示唆された一方で、実機操縦時の感覚を十分に得られないという指摘を受けた。特に全選手から「風に合わせて用具を操作した際に、実機では感じることのできるスピード体感がシミュレータでは感じにくい」という点が述べられた。これは、本シミュレータが目指す「高速航走時に適切に用具を操作する練習」の実現に向けて大きな問題となる。実機での航走時に競技者の頭上から撮影した映像は、図 3 に示す通り、視野のほとんどを空と海が占めており、現在の艇速を判断する手掛かりとなるオブジェクトが乏しい。海面上の白い波頭はスピード体感を得る手掛かりになるが、面積が小さく、常に表示されているわけではない。そこで本研究では、この実写映像に対して、艇速を読み取る手掛かりを付与する加工を行い、スピード体感の再現力の向上を目指すこととした。



図 3: 競技者視点での映像の例

3. 提案手法：CG オブジェクト重畳

本研究では、HMD の映像から搭乗者が得るスピード体感を向上する手段として、ベクションに着目した。ベクションは、視野内のオブジェクトが移動したときに、自分自身が移動しているように感じられる現象である。

以降ではスピード体感が高めるためにはどのような視覚情報を付与すればよいかを検討した結果を詳述する。

3.1 視覚情報によるベクション

ベクションは視覚情報により自身が移動したと感ずる現象であり、静止した列車に乗っているときに隣の列車が動き出すのを見ると、自身が動いているように感じられるのが身近な例となる。

従来研究では、実験参加者に仮想空間上で拡散する点群 (オプティカルフロー) を提示し、ベクションが生じるか調査してきた。例えば、古賀ら[5]は、直線運動と回転運動が共存する場合は交互作用が起きること、妹尾[6]は、非利き目ではベクションを感じる能力が低い可能性をそれぞれ報告している。また、妹尾[7]はベクションを効率的に起こす条件として、周辺視野への提示、広い提示面積、低い空間周波数などが重要であると報告している。

こうしたベクションの実空間での応用としては、道路にペイントを施すことでベクションを発生させ運転手に減速させる手法[8]が用いられている。

以上述べてきた通り、ベクションに関する研究は数多く行われているが、仮想空間上でのオプティカルフロー提示によるものや、実空間上での物理的な視覚情報の提示によるものとなっている。一方で、実写映像を対象にして、何かしらの視覚情報を付与し、ベクションが生じるかを調査した研究は少ない。そこで、筆者らはウインドサーフィンの実写映像に、移動する CG オブジェクトを重畳することで、スピード体感が変化するか調査した[9]。この調査では青い海面に重畳したときの視認性を高めるために、道路の区切りに使われるオレンジ色のポストコーンを用い、ポストコーンが速く移動するほど、またポストコーンの間隔が狭いほどスピード体感が高まることを確認した。しかし、本来道路に存在するポストコーンを海面に表示するのは違和感が強い。またポストコーンを見て速度を読み取る技能を身に付けても、実機搭乗時に適用することができない。そこで本研究では、海上に存在する白い波頭を模擬した CG オブジェクトを重畳表示することで、違和感を低減しつつ、スピード体感を向上する手法を提案する。



図 4: 被験者が視聴する映像

3.2 重畳する CG オブジェクトの概要

実写映像に重畳する CG オブジェクトを考えるにあたり、以下に述べる観点を基に検討を行った。

観点 1: 青い海や空を背景にしても認識できる

観点 2: 搭乗者が速度を想起しやすい

観点 3: シミュレータによる体験自体を壊さない

こうした観点を鑑みて図 4 に示した通り、波頭を表現する白色のオブジェクトを CG で描画し、実写映像の海面部分に重畳した。波頭オブジェクトの周期は 20m で、奥行方向の幅は 2m である。左右幅は視界を十分にカバーするように 200m とした。このオブジェクトは、ウインドサーフィンの速度とほぼ同じ 60km/h で後方へ移動する。

また、重畳対象の実写映像にはセイルやマストが含まれており、それらの上に波頭を重畳すると違和感ある映像となる。そこで、セイルやマストが表示される範囲には、波頭が重畳されないようにマスク処理をしている。

3.3 CG オブジェクトのリアリティ向上

CG オブジェクトのリアリティを向上させることが、バクシオンによるスピード体感に影響を与えると考え、CG のバリエーションを用意した。CG オブジェクトの奥行方向の大きさを $s = \sin(t)$ 倍し (ただし $s > 0$, 周期 2 秒)、波頭の生成と消失を再現(図 5 左)した。 $s < 0$ となる期間は表示されないため、周期を 10m とすることで、波頭が表示される数を他の CG と一致させた。また CG オブジェクトの位置を振幅 1m, 周期 5 秒で変化させることで、波頭の上下移動を再現(図 5 右)した。この組み合わせも含め以下の 5 種類の動画を用意した。

V0: 実写のみ

Vw: 実写+CG オブジェクト

Vs: 実写+CG オブジェクト(生成消失)

Vp: 実写+CG オブジェクト(上下移動)

Vsp: 実写+CG オブジェクト(生成消失と上下移動)

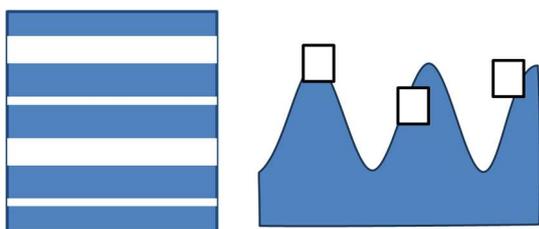


図 5: 波頭の生成消失と上下移動

4. 評価実験

本実験では、提案手法により CG オブジェクトを重畳した映像をシミュレータに搭乗した実験参加者に提示し、スピード体感を向上させられるか検証した。

4.1 実験条件

本実験に用いた実写映像やセンサーデータは JWA の 1 選手が実際に海上で航走したものであり、その長さは約 1 分間である。そして、その映像データに対して、3.3 で示した 5 条件で CG オブジェクトを重畳し、各実験参加者が全て体験する実験参加者内計画として、実験を設計した。本実験の仮説は以下の通りである。

CG オブジェクトに生成消失と上下移動を再現してリアリティを高めるほどスピード体感が向上すると考えられる。

H1: $V_{sp} > V_s > V_w > V_0$

H2: $V_{sp} > V_p > V_w > V_0$

また移動体の面積が大きいほどバクシオンの効果が強いことが知られているので、CG オブジェクトが小さくなる期間がある V_s から得られるスピード体感は小さくなる。

H3: $V_p > V_s$

本実験における実験参加者は、NTT 人間情報研究所内でリクルーティングした 20 代~50 代の男女 8 名である。全ての実験参加者が HMD を装着した状態で WS シミュレータに搭乗した。また、8 名のうち 5 名は眼鏡やコンタクトなど視力を矯正した状態で実験に参加した。

4.2 実験手順

実験参加者は 3.3 で示した 5 条件の映像をランダムな順番で視聴した。1 回視聴するごとにスピード体感と違和感を 7 段階で回答した。この実験を 1 人当たり 2 セット行った。そのため、1 人の実験参加者は合計で 10 回の映像の視聴と主観評価回答を行っている。

4.3 実験結果

図 6 に実験条件ごとに、実験参加者のスピード体感の回答を平均したものを示す。エラーバーは標準誤差である。各条件の平均値は、V0: 4.81, Vw: 4.38, Vs: 4.63, Vp: 4.69, Vsp: 4.69 となり、CG オブジェクトを重畳しない V0 がもっともスピード体感が高くなった。CG オブジェクトを重畳する条件同士での比較では、Vw が一番低く、生成消失と上下移動を再現する条件の方が高くなった。

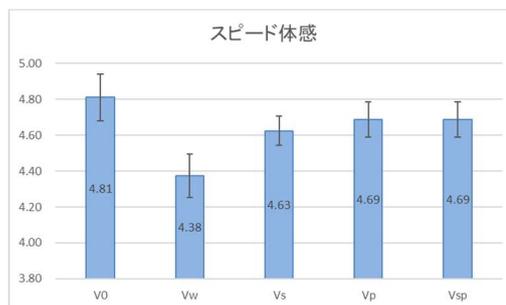


図 6: スピード感の平均

この実験結果にフリードマン検定を行ったところ、有意水準5%で差は認められず、仮説 H1, H2, H3 はいずれも支持されなかった。

図7に実験条件ごとに、実験参加者の違和感の回答を平均したものを示す。各条件の平均値は、V0: 2.38, Vw: 3.56, Vs: 4.00, Vp: 4.25, Vsp: 4.00 となり、CG オブジェクトを重畳しない V0 がもっとも違和感が低くなった。CG オブジェクトを重畳する条件同士での比較では、Vw が一番低くなった。

この実験結果にフリードマン検定を行ったところ、V0 と Vs, Vp, Vsp の間に、有意水準1%で差が認められた。また V0 と Vw の間に、有意水準5%で差が認められた。

この結果により、CG オブジェクトを表示することにより、被験者の違和感は強まった。

実験条件と実験結果の相関係数を表1に示す。

波頭の生成消失、上下移動を再現することで、スピード体感に対してそれぞれ0.02と0.04という正の相関があった。また違和感に対しては0.25と0.33というさらに大きな正の相関があった。スピード体感と違和感の間には-0.18という負の相関があった。

5. 考察

4章で述べたようにCGオブジェクトを重畳することでスピード体感は向上せず、違和感が増す結果となった。こうした結果になった要因として、今回使用したCGオブジェクトは形状が単純な白色直方体であり、実写と合成することによって強い違和感を産んだと考えられる。またボード、セイルより手前にCGオブジェクトが表示されないようにするマスク処理も、一定の形状のマスクを用いたため、海面であってもCGオブジェクトが表示されない領域があることも違和感の原因になった可能性がある。

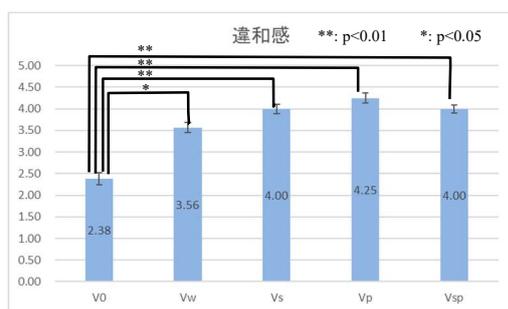


図7: 違和感の平均

表1: 実験条件と実験結果の相関係数

	波頭のCG	波頭の生成消失	波頭の上下移動	スピード体感	違和感
波頭のCG	1.00	0.41	0.41	-0.09	0.53
波頭の生成消失	0.41	1.00	0.17	0.02	0.25
波頭の上下移動	0.41	0.17	1.00	0.04	0.33
スピード体感	-0.09	0.02	0.04	1.00	-0.18
違和感	0.53	0.25	0.33	-0.18	1.00

これらの問題を解決しスピード体感を向上させるためには、実写映像から得た情報をもとに適応的にCGオブジェクトを生成することで、違和感を低減する必要がある。

6. まとめ

本研究ではウインドサーフィンのシミュレータにおいてスピード体感を向上させるために先行研究において発生した違和感を低減するため、実環境中にも存在する波頭をCGオブジェクトとして実写に重畳する手法を提案した。

CGオブジェクトのリアリティを高めるため、波頭の生成消失と上下移動を再現した5つの条件で、8名の実験参加者による被験者実験を行いスピード体感と違和感を評価した。CGの重畳により、違和感が増したがスピード体感は向上しなかった。

今後の課題としては、搭乗者に違和感を与えない方法でベクション現象を発生させ、スピード体感を向上させる手法が必要である。

参考文献

- [1] 江崎 健司, 後藤 充裕, 平野 貴也, 瀬下 仁志: ウインドサーフィンにおける身体感覚再生シミュレータを用いた競技力向上のための初期検討, グループウェアとネットワークサービス, 118巻49号, pp. 1-8, 2023
- [2] PICO Japan: PICO 4 All-In-One VR Headset, 入手先 <<https://www.picoxr.com/jp/products/pico4>> (参照 2024-07-03)
- [3] N-Sports tracking Lab : トラッキング GPS 「HAWKCAST」, 入手先 <<https://n-sportstracking-lab.com/>> (参照 2024-07-03)
- [4] GoPro: GoPro Max 360度アクションカメラ (防水性とブレ補正), 入手先 <<https://gopro.com/ja/jp/shop/cameras/max/CHDHZ-202-master.html>> (参照 2024-07-03)
- [5] 古賀 宥摩, 石津 航大, 松室 美紀, 橋口 哲志, 柴田 史久, 田村 秀行, 木村 朝子: 直線運動と回転運動が共存する場合のベクション効果, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24巻1号, pp. 31-41, 2019
- [6] 妹尾 武治, 清水 隆哉: 単眼・両眼観察及び利き目・非利き目観察とベクション強度の関係, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22巻4号, pp. 553-556, 2017
- [7] 妹尾 武治: 効率的なベクション駆動に関する知見と脳イメージング研究から得られたベクションの知見のVRコンテンツへの活用可能性, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 14巻4号, pp. 481-490, 2009
- [8] 志堂寺 和則: 交通安全のための錯視, 光学, 2010
- [9] 藪内 勉, 後藤 充裕, 江崎 健司, 瀬下 仁志: HMDと物理アクチュエータを活用したウインドサーフィンシミュレータにおけるスピード体感の向上に関する検討, DICOMO, pp. 227-232, 2023