



足底の接地・非接地制御による 着座状態での VR 飛行体験の臨場感向上

Improving Presence of Virtual Flight Experience in Seated Position by Presenting Non-ground Contact Feeling with Sole.

伴祐樹¹⁾, 吉田健人¹⁾, 宇治土公雄介²⁾

Yuki BAN, and Takahito YOSHIDA, Yusuke UJITOKO

- 1) 東京大学 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, tyoshida@s.h.k.u-tokyo.ac.jp)
2) 日本電信電話株式会社 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1, yusuke.ujitoko@gmail.com)

概要: 非日常的な体験の提供は VR のコンテンツの一角をなす。非日常的な体験の中でも、何かに乗った状態もしくは身一つの状態を空を飛ぶ体験を提供する手法の研究が様々になされてきており、コンシューマ向けコンテンツも多数開発されている。本研究では、着座時の足底の接地・非接地を切り替えることによりバーチャルな飛行体験の臨場感を向上させられるという仮説を立て、被験者実験を通じてその妥当性を確かめた。

キーワード: 飛行感覚, 足底触覚提示, 非接地提示

1. はじめに

近年, Virtual Reality (VR) 技術を用いたコンテンツやサービスはリモート会議やトレーニング, エンターテインメント等々で幅広く展開されており, 特にエンターテインメント分野においては「非日常的な体験を気軽に味わえる」という謳い文句が VR コンテンツでよく使われている。VR による非日常体験としてはバーチャル旅行やダイビング, 宇宙遊泳等, 様々なコンテンツが提供されているが, その中で空を飛ぶという体験を提供するものが多くみられる。

研究領域においても VR による臨場感の高い飛行体験の実現に向けた試みが行われており, 風やプロペラによる力を提示したり体を吊ったりすることで, 何かに乗った状態もしくは身一つの状態を飛行する感覚を提示する研究が進められている。臨場感の高い飛行体験を実現するためには飛行中の移動感覚と浮遊感覚の提示が必要と考えられる。これらの移動感覚や浮遊感覚は, 体験者への飛行中の視覚刺激だけでなく, 触覚刺激を加えることで効果的に提示する手法が検討されてきた。移動感覚の提示については触覚刺激として風を用いるものが多く見られる [1, 2]。浮遊感覚の提示においては, 触覚刺激として体を吊ったり水による浮力を利用するアプローチが試みられている [3, 2]。しかしこれらの手法は, 体験者の体に触覚刺激のための様々な機器を取り付ける必要があり体験者の身体的負荷が大きい, もしくは体験場所がプール等に限定されるという問題がある。一方でより軽量の装置を用いた例として, Zhang et al. は Limbic Chair という座ったまま足を自由に動かすことができる椅子を用いて, 飛行体験中の体験者の下半身動作に着

目した研究を行った [4]。彼らは, 自由に足を動かせる場合と立位, 座位を比較した結果, 足が自由に動く場合はより浮遊感覚が生起することを示している。しかし, この手法は実際に足を浮遊させているわけではないので, 体験者が感じる浮遊感には限界があると考えられる。

そこで, 本研究では VR 空間内で乗り物に乗った状態での飛行体験に着目し, 飛行感覚, その中でも特に浮遊感覚を向上させるために, VR 空間中での離着陸に合わせて着座時の足底の接地・非接地を切り替えて提示する手法を提案する。目的達成に向けた第一段階として, 本稿では着座中の足の着地面の高さを変更し, 足底の接地・非接地状態を制御できる実験デバイスを作成し, 提案手法の効果を検証した。

2. 提案手法

先に述べた通り本研究では, VR 空間中での離着陸という視覚刺激提示に合わせて着座時の足底の接地・非接地を切り替えて提示することにより, VR 飛行体験の臨場感・浮遊感を向上させる手法を提案する。本論文では, ユーザが乗り物に乗って飛び立ち, 飛行しながら降りて行き最終的に着陸するというシチュエーションを設定した。

2.1 システム構成

提案手法の効果を検証するための実験システムを構築した。本システムは, VR 環境 (VE: Virtual Environment) 情報を提示する視覚刺激提示部と足裏の接地・非接地を切り替える触覚刺激提示部, そしてそれらを制御するコントローラ部から構成される (図 1)。

触覚刺激提示部として下記の要求機能を定めた: (1) 着席している人の足が接触する床が足から離脱可能, (2) 逆に離



図 1: 浮遊感覚提示システム

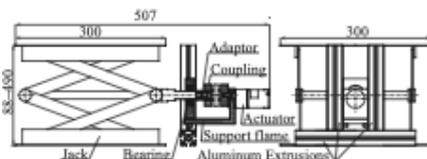


図 2: 触覚刺激提示部の正面図及び部分断面図と側面図

れていた床が足に接触可能, (3) 離脱と接触を VE と同期可能, (4) 床の面積は両足よりも大きい, (5) 離脱前と接触後で床の高さを揃える. まず (1)(2) を実現し浮遊感を損なわないアプローチとして足と床の離脱/接触方法として, 足に対する床の相対動作を VE 内と同様の鉛直方向に限定した. 床が足に接触している間, 着席中の足からの体重を支持可能とするために人間の平均体重の約半分として浮遊感提示デバイスの耐荷重を 30 kg とした. (3) の実現アプローチとして VE 側からマイコン (Arduino Uno) を通じてアクチュエータを制御可能とした. (4) の実現のために移動する床の面積は 300 mm × 300 mm とした. これらの相対動作方向と耐荷重, 可動ストローク, 床面積を容易に実現する方法としてジャッキ (ワーゼフ, RJ300) を採用し, その送りねじをアクチュエータ (ツカサ電工, TG-85E-SV-20-HA, 24V) で回転させる, というアプローチを採用した. アクチュエータと送りねじを同軸として, 送りねじと一緒にアクチュエータも昇降させることでジャッキの天板を昇降させた. アクチュエータと送りねじは継手と送りねじ用工具アダプターで接続し, 送りねじにベアリングをはめ, U 字型の SUS304 の支持フレームを介してアクチュエータを同軸になるように支持した. アクチュエータの回転による支持フレーム全体の回転を防ぎつつ, 支持フレームの鉛直動作のガイドとなるように支持フレームを挟むようにアルミフレームを設置した (図 3). 加えて, (5) の実現のためにジャッキの天板の上にプラダンボールを配置して奥行き方向に天板の面を延長させ, その天板面からジャッキが配置してある床面までの距離を超音波距離センサ (Rainbow E-Technology Co., HC-SR04) により計測した (図 1).

VE 内では乗り物に座った姿勢のアバターを表示し, 乗り物が飛行し始めアバターの足が地面から離れる瞬間に触覚刺激提示部の天板が下がり, 実際の体験者の足も中に浮く様にした. また乗り物が着陸する際には天板が上がり, アバターの足が地面に触れる瞬間に体験者の足も接地する様にした.



図 3: 視覚刺激提示条件)の様子と各々の離陸前主観視点 (左・上: パラモータ, 右・下: 気球)

3. 実験

提案手法の効果を検証するため, 12 名の参加者 (男性 9 名, 女性 3 名, 平均年齢 25.9 ± 1.7SE) を募って実験を行った.

飛行体験と言っても, 飛行中に乗り物の中の床に足を接地する場合と, 足を接地しない場合がある. 本研究で検証する仮説 H1 は, 乗り物の床に足が接地しない場合において, VE 中の離着陸に合わせて足底への接地・非接地を切り替えて提示することで, 着座状態での VR 飛行体験の臨場感・浮遊感が向上する, というものである.

また一般的に VE における五感情報提示では, 現実とは異なっても誇張した提示により臨場感が向上するケースがある [5]. これを踏まえて本研究では仮説 H2 として, 乗り物の床に足が接地する場合においても, 乗り物の離着陸に応じて体験者の足への接地・非接地提示を切り替えることで浮遊感覚が生起されて臨場感が向上する, と考え, 合わせて検証を行った.

参加者は VE 中で飛行体験を行ったのち, その体験の臨場感や体験中の浮遊感等の感覚についてのアンケートに回答した.

3.1 実験条件

触覚刺激提示条件としては, 離着陸や空中での飛行という状況の違いに関わらず常に参加者の足が接地している“常時接地条件”と常に足が浮いている“常時非接地条件”, そして離着陸に合わせて足の接地・非接地を切り替える“切り替え条件”の三種類を用意した. 常時非接地条件を用意したのは, 提案手法の効果が足が浮いていることによるものなのか, 視覚提示に合わせて接地・非接地が切り替わることによるものなのかを検証するためである. また視覚刺激提示条件としては, H2 を検証するために離着陸によりアバターの足が宙に浮く条件と乗り物の床に接地したままの条件として“パラモータ”と“気球”を用意した.

3.2 実験システム

飛行体験の流れを以下に記す. 参加者は実験開始時にヘッドマウントディスプレイ (HMD)(HTC, Vive Pro 2) を装着し, VE 中でパラモータか気球上で着座した状態で体験を開始した. アバターは両足を揃えて乗り物上に着席し, 両手は膝の上においた姿勢をとっており, 参加者には飛行体験中はアバターと同様の姿勢をとる様に指示した. 乗り物は山の中腹から離陸して 193 m 下の湖面まで降下した. 離陸時はまず水平方向に 1.58 m/s^2 で加速し, 4.76 m/s に達してか

らは等速で水平方向に飛行した。飛行を開始してから6秒後から下降を開始し、鉛直下向きに0.018 m/s²で加速した。その後、着陸地点の10 m上空から水平方向、鉛直方向共に減速をはじめ、着地の瞬間には0.05 m/sで降下しているようにした。この速度は切り替え条件時における触覚刺激提示部の床面の速度に揃えた。体験中の飛行時間は約105秒であった。また、離陸前は15秒間、着陸後は10秒間の静止時間を設けた。

参加者は靴を脱いだ状態で椅子に座り、触覚刺激提示部の天板に足を置くように指示された。実験中、椅子は移動・回転しないようロックされていた。各実験参加者の体型に合う様、実験開始前に天板の高さの調整を行った。まず、踵が軽く浮き、母趾球からつま先にかけては接地している高さ天板の位置を調整し、これを接地状態の高さとした。その後4.0 cm天板を下げて足が天板に接触しないことを確認し、これを非接地状態の高さとした。接地・非接地の切り替えは0.8秒で行うようにした。また、触覚刺激提示部のモータ駆動音等、周囲の音が飛行体験を妨げるのを避けるため、参加者には実験中ノイズキャンセリングヘッドフォン(SONY, WH-1000XM4)を装着させ、ホワイトノイズを流した。音量については3人に対するの予備検証により、モータの音が聞こえないレベルを設定した。

3.3 評価方法

飛行体験の評価として、VR空間の臨場感評価のためのIgroup Presence Questionnaire(IPQ) [6]と先行研究[7]で用いられていた飛行体験の主観評価(没入感、浮遊感覚、移動感覚、体験の好み、体験の楽しさ)を問う質問に回答させた。IPQについてはfive-point scale、その他の主観評価についてはVisual Analog Scale(VAS)を用いて0-100のスケール(0:全くない、100:非常に高い)で評価を行った。その他に、各条件での飛行体験中の視線の動きや、生体情報(心電、発汗)を計測した。

3.4 実験手順

上述した天板位置の調整を行ったのち、参加者はHMDを装着して右手に主観評価回答用のコントローラを持たされた。参加者は実験タスクが始まる前に、飛行体験から主観評価回答までの練習を行った。そのため、実験タスク前に参加者は主観評価の質問内容を把握していた。離陸前や飛行中、着陸後は頭や視線は自由に動かしてあたりを見渡して良いものとし、その他の姿勢は動かさないように伝えた。離陸から飛行、着陸までを行う実験タスクは、視覚刺激提示2条件×触覚刺激提示3条件の計6条件を一回ずつ実施した。条件の提示順序を参加者間で均等にするため、提示順序はラテン方格法で作成した。全タスク終了後、実験中感じたことについて自由回答で回答させた。

3.5 実験結果

実験結果としてIPQとその他の主観評価結果を示す(図4,5)。IPQの結果について、視覚・触覚刺激提示それぞれの影響をみるために整列ランク変換(Aligned Rank Transform; ART [8])を使用した二元配置反復測定分散分析を行った

表1: IPQ に対しての ART 二元配置反復測定分散分析結果

		Overall Presence	Spatial Presence	Involvement	Realness	
main effect	視覚刺激 (V)	F _{1,11} = 1.69	F _{1,11} = 0.03	F _{1,11} = 0.13	F _{1,11} = 0.09	
	触覚刺激 (H)	F _{2,22} = 3.66	F _{2,22} = 1.78	F _{2,22} = 2.19	F _{2,22} = 5.99	
TWI		V x H	F _{2,22} = 9.35	F _{2,22} = 4.50	F _{2,22} = 4.65	F _{2,22} = 12.1
post hoc	H at パラモータ	χ ² = 11.6	χ ² = 6.18	χ ² = 12.7	χ ² = 14.6	
	H at 気球	χ ² = 0.50	χ ² = 1.00	χ ² = 0.19	χ ² = 12.7v	

TWI: two-way interaction □: p<.01, □: p<.05

表2: 飛行体験の主観評価に対しての二元配置反復測定分散分析結果

		没入感	浮遊感覚	移動感覚	体験の好み	楽しさ	
main effect	視覚刺激 (V)	F _{1,11} = 8.63	F _{1,11} = 15.6	F _{1,11} = 8.41	F _{1,11} = 17.9	F _{1,11} = 13.2	
	触覚刺激 (H)	F _{2,22} = 3.68	F _{2,22} = 9.27	F _{2,22} = 6.23	F _{2,22} = 3.93	F _{2,22} = 11.4	
TWI		V x H	F _{2,22} = 18.9	F _{2,22} = 16.0	F _{2,22} = 5.41	F _{2,22} = 9.81	F _{2,22} = 3.5v0
post hoc	H at パラモータ	F _{2,22} = 15.4	F _{2,22} = 16.4	F _{2,22} = 9.85	F _{2,22} = 5.54	F _{2,22} = 10.5	
	H at 気球	F _{2,22} = 3.38	F _{2,22} = 2.24	F _{2,22} = 0.52	F _{2,22} = 0.43	F _{2,22} = 6.14	

TWI: two-way interaction □: p<.01, □: p<.05, □: p<.10

(表1)。全ての評価値について交互作用が確認されたため、パラモータ・気球の各条件について下位検定としてフリードマン検定を行い、有意差が確認されたものについてHolm法で多重性を補正したWilcoxonの符号順位検定を行った。有意差が確認されたものを図4に示す。

同様にその他の主観評価結果についても検定を行った。まず、条件ごとの正規性をShapiro-Wilk検定にて確認したところ、正規分布との有意差は確認されなかったため、視覚・触覚刺激提示要因に対して二元配置反復測定分散分析を実施した(表2)。その結果全ての項目で交互作用が確認されたため、パラモータ・気球の各条件について下位検定として一元配置反復測定分散分析を行い、有意差が確認されたものについてHolm法で多重性を補正した対応のあるt検定を行った。有意差が確認されたものを図5に示す。

3.6 考察

図4(a)より、パラモータ条件においては常時非接地条件の方が常時接地条件よりも、切り替え条件の方が常時非接地条件よりも臨場感についての評価が高くなることが示唆された。この傾向はIPQのそれぞれの評価指標においてもみられ、没入感についてのVAS評価においても切り替え条件が常時接地・常時非接地条件よりも評価値が高かった。実験後の自由回答からも「バーチャル環境の状況に合わせて足が宙に浮くことで臨場感が高まった」との回答が8人の参加者から得られた。一方で気球条件においては、IPQのOverall presenceについても没入感評価においても触覚刺激提示条件間で有意差は確認されなかった。ただし、現実世界と比較した際のリアルさ(realness)については常時接地条件が常時非接地条件よりも有意に評価値が高く、実験後の自由回答からも「気球に乗っている際に足が接地しないのは違和感があった」という回答が6件みられた。以上より、乗り物の床面にアバタの足が接地している状況下で足を非接地状態にすると、現実とVEとの接触状況の食い違いからリアリティが低下し、臨場感が下がることが示唆された。

浮遊感覚については切り替え条件・常時非接地条件が常時接地条件よりも有意に評価値が高かった。自由回答からも「実際に足が浮いていることで浮遊感を強く覚えた」「飛び

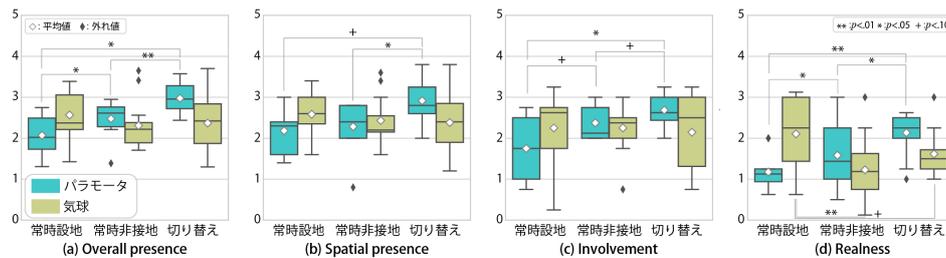


図 4: IPQ の box plot (中央値, 四分位点, 平均値. 外れ値は四分位点から 1.5 倍以上離れたデータ)

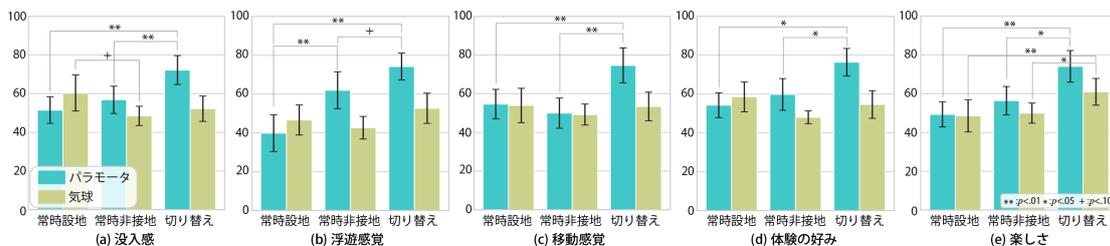


図 5: 主観評価結果 (0: 全くない-100: 非常に高い) の平均値±標準誤差

立つ瞬間に足が浮くことで浮いている感覚が強まった」等、足が浮く条件において浮遊感を強く知覚したという回答が多く見られた。一方で、気球条件では触覚刺激提示条件間で浮遊感覚についての有意な差は見られなかった。以上より、浮遊感覚の提示においては VE・実環境共に体験者の足を浮かすことが重要であることが示唆された。

移動感覚・体験の好みについては、パラモータでの切り替え条件が唯一平均スコアが 70 を超えており他の条件に比べて有意に評価値が高く、他の条件間では有意差が見られなかった。本提案手法は浮遊感覚の向上を目的としており、移動感覚への影響は想定していなかった。しかし、今回の結果から離着陸に応じて足底への接地・非接地を切り替えることにより飛行体験中の移動感覚が向上する可能性があり、今後よりプリミティブな条件での検討が必要である。

体験の楽しさについては、パラモータ・気球の両視覚刺激提示条件において切り替え条件が常時接地・非接地条件よりも有意に高い評価となった。自由回答からも「飛び立つ瞬間に足が浮くことでわくわくした/楽しかった」という回答が 5 人の参加者から得られ、気球条件においては「足がついたままの方がリアリティは高くなったが、体験のわくわく感は減った」という回答もみられた。

以上より、VE・実環境共に体験者の足を浮かすことが浮遊感提示において重要であり、VE 内の離着陸に応じて足底への接地・非接地を切り替えることにより飛行体験中の臨場感や浮遊感・楽しさを向上させられることが示唆され、仮説 H1 が立証された。一方、アバタの足が乗り物の床に接地した状態で飛行する状況においては、足底への接地・非接地の切り替え提示が臨場感・浮遊感に寄与しないことが示唆され、仮説 H2 は棄却された。ただし、そのような状況であっても提案手法により体験の楽しさは向上させられる可能性が示された。今後、体験中の参加者の視線や生体情報を解析することで、各条件の体験の違いを定量的に評価していく。

4. おわりに

本研究は、VE 中の離着陸に合わせて体験者の足の接地・非接地を切り替えて提示することで、着座状態での VR 飛行体験の臨場感を向上させる手法を提案した。実験の結果、VE と現実での足の接地・非接地を同期させることで、飛行体験中の臨場感や楽しさを向上させられることが示唆された。本提案手法は風の提示等、既存の飛行体験臨場感向上手法と組み合わせられるため、それらの手法と統合することで飛行体験の臨場感をより向上させられる可能性がある。
謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤 B) 「課題番号 21H03478」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Max Rheiner. Birdly an attempt to fly. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, pp. 1–1. 2014.
- [2] 小林誠人ほか. 流水プールと水中 HMD による飛行感覚の提示. *信学技報*, Vol. 120, No. 190, pp. 31–35, 2020.
- [3] Horst Eidenberger, et al. Indoor skydiving in immersive virtual reality with embedded storytelling. In *Proc. of the 21st VRST*, pp. 9–12, 2015.
- [4] Yaying Zhang, et al. Perch to fly: Embodied virtual reality flying locomotion with a flexible perching stance. In *Proceedings of DIS*, pp. 253–264, 2019.
- [5] Shangyin Zou, et al. Simulating olfactory cocktail party effect in VR: A multi-odor display approach based on attention. In *IEEE VR*, pp. 474–482, 2022.
- [6] Thomas Schubert, et al. The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence*, Vol. 10, No. 3, pp. 266–281, 2001.
- [7] Abraham Hashemian, et al. Headjoystick: Improving flying in vr using a novel leaning-based interface. *TVCG*, 2020.
- [8] Jacob O. Wobbrock, et al. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. *CHI '11*, pp. 143–146. ACM, 2011.