

# Drone Rider: 飛行感覚と没入感を高めるフィードバック技術

○島藤 和也, 後藤 優太, 岡本 正吾, 沈 虹, 楊 寒壹 (東京都立大学)

## Drone Rider: feedback technology for sense of flying and immersion

○ Kazuya SHIMATO, Yuta GOTO, Shogo OKAMOTO,

Hong SHEN, Hanyi YANG (Tokyo Metropolitan University)

Abstract: We are developing Drone Rider, a VR system that allows users to fly freely over the sky on a drone. There are sensory feedback techniques enabled by the Drone Rider, and we verified and ranked the effectiveness of each of them, and investigated their interactions. Experimental results from a VR flight experience using the Drone Rider showed that wind according to the speed from the front, passive inclination of the footing, and vibratory stimulation to the feet were effective in that order, and no interaction effects were observed.

### 1. 緒言

バーチャルリアリティ (VR) は仮想的な空間を現実であるかのように提供し, 非日常体験や様々なシミュレーションを可能にする. その中でも VR による仮想的な飛行体験は人々に新たな知見を与える重要なコンテンツである. 実際, VR フライトシミュレータや VR で空を飛ぶ非日常体感を可能にしたアプリケーションが多く商業化されている<sup>1)~4)</sup>. われわれは, このような飛行体験をよりよいものにするために必要な要素は何か議論を重ねてきた. 本研究では, 研究目的である空を飛んでいる感覚の創出につながる VR と感覚フィードバックを組み合わせた手法を提案する. 本研究は, フライトシミュレータやアプリケーション開発者に新たな洞察を与える.

手法の有効性を検証するためわれわれは, VR 空間でドローンの上に乗る, 自由に空を飛行する体験を可能にした Drone Rider を開発している<sup>5), 6)</sup>.

先行研究では, VR ドローン飛行体験において足場の受動的な傾きと足への振動刺激, 速度に応じた前方からの風が飛行感と没入感を向上することを報告した<sup>5), 7)</sup>. Shen らは, ドローン飛行体験において操縦者のリアルの手を半透明で VR 空間に映し出すことで, 没入感と運動主体感が向上することを報告した<sup>6)</sup>.

本研究では, これまで VR 飛行体験において有効性が示された手法を組み合わせ, それぞれの効果の検証と順位付けをし, 相互作用をみることでより良い VR 飛行体験に必要な要素を明らかにした.

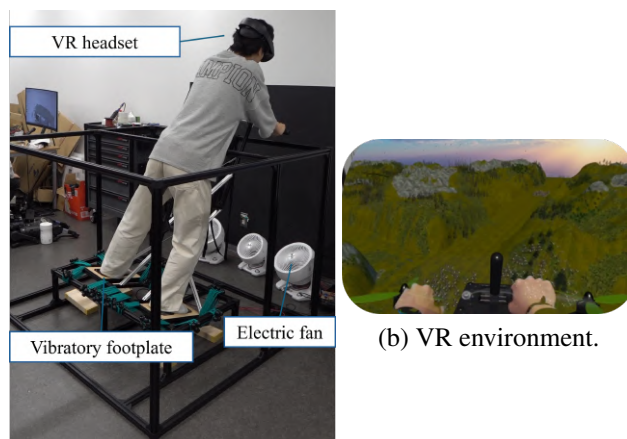
### 2. 装置: Drone Rider

#### 2.1 システム構成

ドローンライダーは, VR ヘッドセット (Meta Quest pro, Meta Platforms, Inc., CA), ハンドル付き振動フットプレート, 電気ファン (Oriental Motor Co., Ltd., Japan) から構成された **Figure 1(a)**.

VR ヘッドセットから VR 環境とそれに重ね合わさる操縦者のリアルの手が投影された **Figure 1(b)**. ドローンライダーの外枠と前方の壁は黒色で統一した.

振動フットプレートは外枠とバンジーコード (Yutaka make Co., Ltd., Japan) で接続され, 操縦者の重心移動に



(a) System appearance.

(b) VR environment.

**Fig. 1** System configuration of the Drone Rider.

応じて受動的にピッチ, ロール方向に傾いた. 振動フットプレートとハンドルは一体化しており, フットプレートの傾く方向にハンドルも傾いた. 振動フットプレートの左右には2つずつのボイスコイルモータ (Vp7, Acouve Laboratory Inc., Japan) が搭載された. VR 環境で再生された音源がボイスコイルモータから振動と音として出力された. ボイスコイルモータはオーディオアンプ (FX-AUDIO-FX-2020A+, North Flat Japan, Japan) に接続され, 左右独立に制御された.

電気ファンは, 操縦者の前方に左右1つずつ設置された. 左右のファンはマイクロコンピュータ (Arduino Mega 2560) とモーターコントローラに接続され, 独立に制御された. ドローンの速度に応じて線形にファンの回転数が決定された.

#### 2.2 ソフトウェアシステムと VR 環境

ドローンライダーの開発には Unity (2022.3.11f1, Unity Technologies, CA) を使用した. VR ヘッドセットのピッチ方向の回転で, ドローンの前後の移動が決定した. ロール方向の傾きでドローンの左右の旋回が決定した. VR ヘッドセットの傾きからドローンの速度と風の強さが線形に決定された. また, ドローンの筐体は操縦者の足元に見える, その傾きは VR ヘッドセットの傾きと同期した. VR ヘッドセットのシースルー機能とハ

ンドトラッキング機能を組み合わせ、手腕とその周辺に限定して操縦者のリアルの手がVR空間に重るようにして投影された。

VR環境は鳥が無数に飛び交う自然地形の上空であった。

### 3. 提案手法

#### 3.1 足への振動刺激

操縦者はボイスコイルモータを踏むようにして振動フットプレートに立つことで足裏から振動が提示された。操縦者は足の下部全体に振動を感じた。ボイスコイルモータから音と振動として足に提示した音源は、バイクの排気音であった。これは、足に提示される音と振動によってドローンの上に乗っている感覚を演出する狙いがある。この感覚が没入感を向上させると仮説を立てた。また、VR映像と足への振動刺激を組み合わせることで向上する自己移動感覚(Self-motion perception)が飛行感を向上させると仮説を立てた<sup>8),9)</sup>。

#### 3.2 足場の受動的な傾き

フットプレートがバンジーゴムと接続されることで、操縦者の重心移動に伴って受動的にフットプレートがピッチ、ロール方向に傾いた。つまり、操縦者が傾いた方向にフットプレートも傾きそれと同じ方向にVR空間のドローンも傾く。VRヘッドセットから提示される視覚の傾きと身体が傾くことによる前庭感覚の傾きが一致することでドローンの上に乗っている感覚を演出し没入感を向上させる狙いがある。

#### 3.3 速度に応じた前方からの風

電気ファンからの風量がドローンの速度に線形に変化した(最大風速2.9 m/s)。風は前方から操縦者の上半身に向けて提示された。前方からの風の提示により操縦者が前に進んでいる感覚(自己移動感覚)を生起させ飛行感を向上させる狙いがある。さらに、速度に応じた風により飛行体験における没入感を向上させる狙いがある<sup>7)</sup>。

#### 3.4 リアルの手腕の投影

操縦者の手腕とその周辺にシースルーを適用した。Unityにおける不透明度の設定により、手腕が明瞭に見える状態でVR空間に半透明に投影された。リアルの手をVR空間に半透明で投影することでドローンを自身で操縦している感覚(運動主体感)を向上させる狙いがある。さらに、この感覚がドローンに乗って空を飛んでいる感覚につながり、没入感と飛行感を向上させる狙いがある。

## 4. 実験

### 4.1 参加者

参加者は東京都立大学所属の20代男女10名(女性:5名)であった。彼らは同意書に同意したうえで実験を行った。

## 4.2 実験手順

参加者はドローンライダーの操縦に慣れるため、練習操縦をした。練習操縦は2-3分程度であった。足の順応を回復するため参加者は1分間椅子に座って休憩した。実験では、操縦者は自然地形の上空を1分間自由に飛行した。操縦者の酔いやすさに合わせて左右の旋回頻度は調節された。参加者は実験の際10秒に一度自身の手の位置を確認した。実験後参加者は直ちに口頭でアンケートに回答した。アンケート項目は飛行感、没入感、運動主体感、満足度に関する以下の4つであった。Q1: 体験では、空を飛んでいる感じがしたか?、Q2: 体験では、VR空間に没入している感じがしたか?、Q3: ドローンを自分自身で操縦しているように感じたか?、Q4: 全体を通して体験は楽しいものだったか?参加者はそれぞれのアンケート項目について0-9の10段階で評価した(0: 一瞬も感じなかった, 1: ほんのわずかに感じた, 9: とても感じた)。条件の数は4つの手法の有無を組み合わせた計16条件であった。参加者は休憩と実験、アンケートを条件の数だけ繰り返した。

## 4.3 分析方法

Q1-Q3のスコアに4要因の多元配置分散分析を適用し、各手法の主効果と2手法間の交互作用を調査した。要因は、振動刺激、フットプレートの傾き、風刺激および、操作者の手腕の投影であった。それぞれの要因は、その効果の有無の2水準からなった。主効果の強さを判断するために、主効果の $p$ 値を参照した。主効果の $p$ 値が低い要因が、より効果が高いと判断した。各主効果の自由度が等しいことから、 $p$ 値による判断は、 $F$ 値により判断および、効果量による判断と相違ない。

## 5. 結果

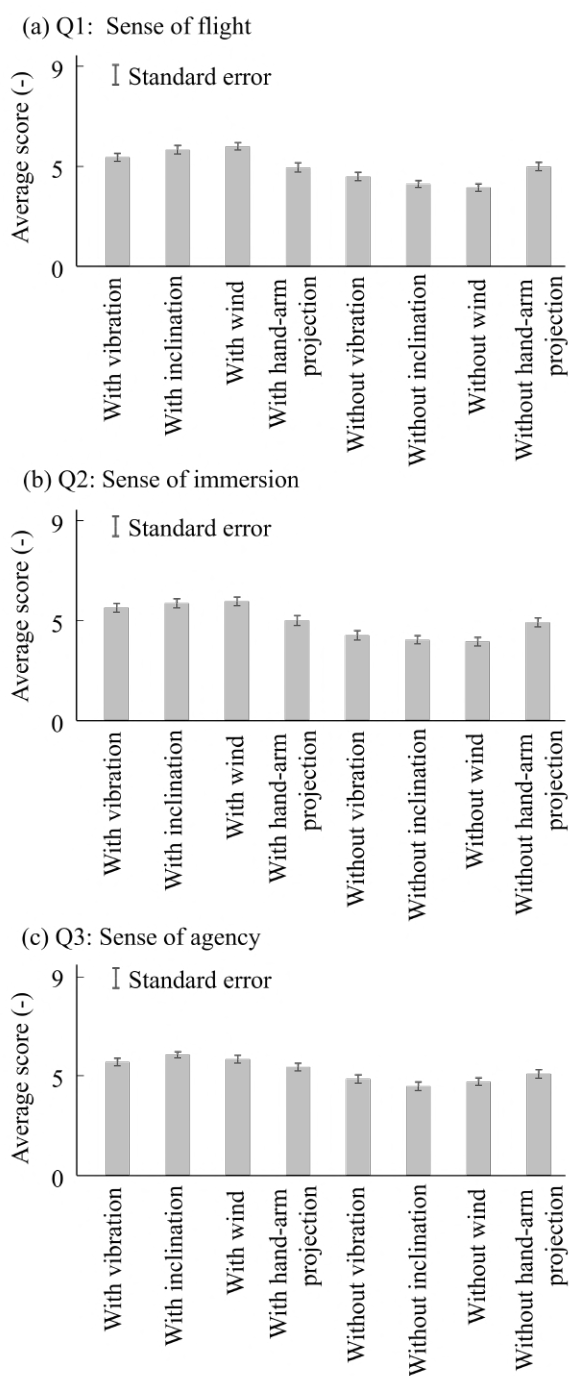
各手法に関して、その手法が適用されたのときのスコアの平均値をFigure 2に示す。例えば、with wind条件の平均スコアは、風刺激が有効であったすべての条件のスコアの平均である。

飛行感に関して、平均スコアが高い傾向順に前方からの風あり条件、傾きあり条件、振動あり条件、手腕の投影なし条件であった。没入感に関しては、平均スコアが高い順に風あり条件、傾きあり条件、振動あり条件、手腕の投影あり条件であった。運動主体感に関しては、平均スコアが高い順に傾きあり条件、風あり条件、振動あり条件、手腕の投影あり条件であった。

Q1の飛行感、Q2の没入感、Q3の運動主体感のそれぞれのスコアに対する多元配置分散分析の結果をTable 1に示す。

飛行感に対する振動刺激、足場の傾き、前方からの風に関して $p$ 値はそれぞれ $1.6 \times 10^{-5}$ 、 $4.2 \times 10^{-13}$ 、 $4.5 \times 10^{-17}$ であり飛行感を有意に向上させた。 $p$ 値をもとにして効果を判断すると、前方からの風の効果がもっとも高く、足場の傾きと、振動刺激がそれに続くことを意味する。手腕の投影は、飛行感に対して有意な効果が認められなかった。

没入感に対する振動刺激、足場の傾き、前方から



**Fig. 2** Average scores and standard errors of Q1 (Sense of flight), Q2 (Sense of immersion), and Q3 (Sense of agency) for each stimulus condition.

の風に関して  $p$  値はそれぞれ  $9.8 \times 10^{-8}$ ,  $1.0 \times 10^{-11}$ ,  $1.3 \times 10^{-13}$  であり, 没入感を有意に向上させた. 没入感の向上にもっとも有効であったのは, 前方からの風であり, 足場の傾き, 振動刺激がそれに続いた. 手腕の投影には, 有意な効果が認められなかった.

運動主体感に対する振動刺激, 足場の傾き, 前方からの風に関して  $p$  値はそれぞれ  $5.9 \times 10^{-4}$ ,  $1.1 \times 10^{-9}$ ,  $7.3 \times 10^{-6}$  であり, 没入感を有意に向上させた. 足場の傾きの効果をもっとも高く, 前方からの風と, 振動刺激がそれに続いた. 手腕の投影の効果は, 顕著でな

**Table 1** Main effects of each method and significant interaction.

(a) Sense of flight		
Vibration	$F(1, 149) = 19.9$	$p = 1.6 \times 10^{-5}$
Inclination	$F(1, 149) = 63.2$	$p = 4.2 \times 10^{-13}$
Wind	$F(1, 149) = 90.6$	$p = 4.5 \times 10^{-17}$
Hands projection	$F(1, 149) = 0.0581$	$p = 0.81$
(b) Sense of immersion		
Vibration	$F(1, 149) = 31.4$	$p = 9.8 \times 10^{-8}$
Inclination	$F(1, 149) = 54.5$	$p = 1.0 \times 10^{-11}$
Wind	$F(1, 149) = 66.6$	$p = 1.3 \times 10^{-13}$
Hands projection	$F(1, 149) = 0.151$	$p = 0.70$
(c) Sense of agency		
Vibration	$F(1, 149) = 12.3$	$p = 5.9 \times 10^{-4}$
Inclination	$F(1, 149) = 42.4$	$p = 1.1 \times 10^{-9}$
Wind	$F(1, 149) = 21.6$	$p = 7.3 \times 10^{-6}$
Hands projection	$F(1, 149) = 2.09$	$p = 0.15$

かった.

また, 飛行感, 没入感, 運動主体感について, 手法間の交互作用はみられなかった.

## 6. 議論

分散分析の結果から足への振動刺激, 足場の受動的な傾き, 前方からの速度に応じた風が, VR 飛行体験における飛行感, 没入感, 運動主体感に効果的であった.

飛行感および没入感に関しては, 前方からの速度に応じた風, 足場の受動的な傾き, 足への振動刺激の順に有効であった. 飛行感と没入感のスコアは, 高い相関係数(0.82)を示し, 実験参加者にとっては, 両者は密接に関係するか, 実質的に同じであった可能性がある. 風刺激は, VR 環境での自己移動感覚に作用することが知られている<sup>10)</sup>. 本実験では, 風刺激が空を移動している感覚の向上につながった可能性がある.

運動主体感に関しては, 足場の受動的な傾き, 前方からの速度に応じた風, 足への振動刺激の順に有効であった. 足場の受動的な傾きの効果が高かったが, これは, VR 空間の映像と足場と体の傾きが一致することで, ドローンを操縦している感覚が向上し, 運動主体感の向上につながったからではないだろうか. 視覚刺激と前提感覚刺激が同時に提示されることが, 自己移動感覚に効果的に作用することは, 先の研究が示しているとおりである<sup>11)~15)</sup>.

足場の受動的な傾きと前方からの速度に応じた風は, 調査されたいずれのアンケート項目にも, 大きく作用したことから, 飛行体験を供する VR アプリケーションにとって重要であると推察する.

一方で, 手腕の投影は飛行感, 没入感, 運動主体感のいずれも有意に向上させず, VR 空間にリアルの手

腕を投影することはVR飛行体験に有効かどうか疑問が抱かれる結果となった。これは、われわれの期待に反した。手腕の投影については、「ドローンを操縦している感覚が増す」という好意的な意見があったものの、「VR空間に現実の要素が見えることで、空の上にいるという非日常(非現実)感が低下した」、「CGとカメラ画像が重畳して表示されることで、視覚刺激の鮮明さが損なわれた」などの否定的な意見があった。こういった欠点が克服されれば、操縦者の手腕をVR映像に投影することの効果は期待できると考えられる。手腕投影の効果を発揮できる手法の追求が課題である。

## 7. 結言

空を飛んでいる感覚を創出するため感覚提示技術の有効性を検証した。それらの手法の効果とその順位付け、またそれぞれの交互作用を調査した。実験の結果、足・下腿への振動刺激、足場の受動的な傾きおよび、前方からの速度に応じた風刺激が、VR飛行体験における飛行感、没入感、運動主体感を向上させた。飛行感と没入感を向上させるためにもっとも効果が高いのは、風刺激であった。運動主体感を向上させるためにもっとも効果が高いのは、足場の受動的な傾きであった。今後は、VR飛行体験における手腕の投影についてその手法を模索することを課題とする。

## 参考文献

- [1] J. Cross and C. C. Boag-Hodgson. A Collaborative Virtual Reality Flight Simulator: Efficacy, Challenges and Potential. Authorea Preprints, (2024).
- [2] H. Janocha and B. Diewald. ICAROS: over-all-calibration of industrial robots. *Industrial Robot: An International Journal* 22.3, pp. 15–20, (1995).
- [3] K. Valentino, K. Christian, and E. Joelianto. Virtual reality flight simulator. *Internetworking Indonesia Journal* 9.1, pp. 21–25, (2017).
- [4] M. Daniele et al. Development of a Virtual Reality Real Time Helicopter Flight Simulator. *25th Conference of the Italian Association of Aeronautics and Astronautics. AIDAA*. (2019), pp. 482–489.
- [5] K. Shimatoh, Y. Goto, and S. Okamoto. Drone Rider: Enhanced Feelings of Flying Using a Vibratory and Passively Inclining Foot Plate. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. (2024). doi: 10.1109/SII58957.2024.10417440.
- [6] H. Shen et al. Drone Rider: Effects of Translucent Actual Own Body Parts on Embodiment in Virtual Reality Space. *International Symposium on Affective Science and Engineering*. (2024), pp. 1–4. doi: 10.5057/isase.2024-C000040.
- [7] K. Shimato, Y. Goto, and S. Okamoto. Drone Rider: Enhancing VR Flying Experiences via Directed Wind Stimuli. *IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics*. (2024).
- [8] I. Farkhatdinov, N. Ouarti, and V. Hayward. Vibrotactile inputs to the feet can modulate vection. *2013 World Haptics Conference*. IEEE. (2013), pp. 677–681.
- [9] R. Nordahl et al. Vertical illusory self-motion through haptic stimulation of the feet. *2012 IEEE VR Workshop on Perceptual Illusions in Virtual Environments*. IEEE. (2012), pp. 21–26.
- [10] K. Murata et al. Self-motion perception induced by cutaneous sensation caused by constant wind. *Psychology* 5.15, p. 1777, (2014).
- [11] K. Sakurai et al. Perceived direction of self-motion from orthogonally directed visual and vestibular stimulation in passive and active observation. *i-Perception* 2.8, pp. 886–886, (2011).
- [12] T. Mergner et al. Visual contributions to human self-motion perception during horizontal body rotation. *Archives italiennes de biologie* 138.2, pp. 139–166, (2000).
- [13] D. R. Berger, J. Schulte-Pelkum, and H. H. Bühlhoff. Simulating believable forward accelerations on a Stewart motion platform. *ACM Transactions on Applied Perception* 7.1, pp. 1–27, (2010).
- [14] R. Ramkhalawansingh et al. Examining the effect of age on visual-vestibular self-motion perception using a driving paradigm. *Perception* 46.5, pp. 566–585, (2017).
- [15] A. Berthoz, B. Pavard, and L. R. Young. Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Experimental brain research* 23, pp. 471–489, (1975).