

# VR吹き矢：呼吸リハビリテーション活用に向けた体験設計

谷川 斗真<sup>1,a)</sup> 佐々木 智也<sup>1</sup> 宮崎 敦子<sup>1</sup> 登嶋 健太<sup>1</sup> 檜山 敦<sup>1,2</sup> 稲見 昌彦<sup>1</sup>

**概要：**我々は、呼吸機能が低下した人を対象に手軽に呼吸リハビリテーションを提供することを目的にVR吹き矢を開発している。リハビリテーションを継続的に行う上では、モチベーションの維持のためのユーザー体験の設計が重要になる。本研究では、VR吹き矢のプロトタイプを用いてユーザー体験の調査を行った。特に入力に呼気の強度を連動させることがユーザーにどのような影響を与えるのか検証した。

## 1. はじめに

呼吸機能は、私たちの生活の質を維持する上で欠かせないが、加齢 [1] や喫煙 [2]、感染症 [3] といった様々な要因で低下することが知られている。このような加齢や疾患によって呼吸機能が低下した患者に対して、リハビリテーションやトレーニングの目的で、吹き矢が用いられることがある [4], [5]。

吹き矢では、大きく息を吸い、強く吹く動作が要求されるため、呼吸機能のトレーニング効果がある [5]。しかしながら、吹き矢の実施には専用の器具や、人との間に一定の空間が必要である。高齢者施設や医療施設で日常的に行うためには、安全性を確保する観点からも課題がある。

そこで我々は、吹き矢実施における課題を解決するために、バーチャルリアリティ (VR) 技術を用いたVR吹き矢を提案している。我々のVR吹き矢は、手軽に呼吸リハビリテーションを提供することを目的にしている。これまでに、外部センサを用いずにヘッドマウントディスプレイ (HMD) 単体で呼気を検出するアルゴリズムを開発し、それを用いたトレーニングタスクの検討を行った [6]。

先行研究において、VR吹き矢のインタラクションを構成する基本機能を実現した。一方で、実際のユーザーに呼吸リハビリテーションを提供するためには、基本的な呼吸インタラクションの実装だけで不十分である。例えば、モチベーションを維持して継続的にできるように楽しい体験を提供することや、ユーザーの能力に応じた難易度の調整といったVRの体験設計が重要になる。

本研究では、まず、体験設計に基づいてユーザーごとのキャリブレーションや得点表示機能がある吹き矢のゲーム



図1 VR吹き矢プロトタイプ

といった一連の流れを含んだVR体験が行えるプロトタイプを設計し、実装する (図1)。そして、プロトタイプを用いて実験を行い、提案するVR吹き矢のユーザー体験について検証する。特に、射出条件の違いによる影響を調べ、今後のユーザー体験設計について検討した。

## 2. 関連研究

### 2.1 呼吸リハビリテーションと吹き矢

呼吸リハビリテーションやトレーニングは、様々な要因で呼吸機能が低下した患者に対して効果が期待できる。例えば、呼吸機能の指標のひとつである最大呼气流速 (PEFR: peak expiratory flow rate) は、加齢によって衰えることが知られている [1]。高齢者の呼吸機能が低下すると咳や嚥下機能も低下するので、誤嚥性肺炎のリスクが高まる [7]。呼吸リハビリテーションは嚥下機能の改善に対して用いられる [8]。慢性閉塞性肺疾患 (COPD: Chronic Obstructive Pulmonary Disease) は、喫煙習慣が原因で発症し、肺が炎症することで呼吸がしにくくなる [2]。COPD患者に対して呼吸リハビリテーションの効果があることが報告されている [9]。また、コロナ感染症患者は、後遺症として呼吸機能が低下することがあるが、これに対して呼吸リハビ

<sup>1</sup> 東京大学

<sup>2</sup> 一橋大学

a) toma92toop@star.rcast.u-tokyo.ac.jp

リテーションが有効であると報告されている [3]。このように、呼吸リハビリテーションが対象とする患者の範囲は広く、手軽に実施できるプログラムを開発することは有用であるといえる。

呼吸リハビリテーションのひとつとして、吹き矢が用いられることがある [4]。吹き矢を行うには、大きく息を吸い、強く吹く動作が必要となるため、PEFR を向上させる効果がある [5]。また、吹き矢の競技性や遊戯性は継続的に呼吸のトレーニングを行うことを促進するため、重症患者へのリハビリテーションだけでなく、オーラル・フレイル [10] の予防や改善効果も期待できる。しかしながら、吹き矢を行うためには器具や一定のスペースの準備が必要であり、高齢者施設や医療機関で日常的に行うには安全性の確保に負担がかかるといった課題がある。

これまでに吹き矢を対象としたインタラクティブシステムの研究では、主に吹き矢の遊戯性に注目している。例えば、石川ら [11] は測距センサなどを取り付けた専用のデバイスを用いて VR 空間におけるスポーツ吹き矢の遊戯性向上を目指した。吹き矢を呼吸リハビリテーションに適用することで期待される効果が大きいにも関わらず、高齢者施設や医療機関で手軽に吹き矢を提供するといった目的で取り組まれた研究はほとんどない。

## 2.2 VR 体験における呼吸インタラクション

呼吸インタラクションを用いたインタラクティブシステムの研究は、吹き矢をアプリケーションとしたもの以外にも提案されている。例えば、ディスプレイ型 [12] や複合現実感 (MR) 用デバイス [13]、マスク型 [14]、タブレットを用いたもの [15] がある。

さらに、HMD を用いた VR 空間において、コントローラーや音声を使用しない新しいインタラクション方法として、VR 体験における呼吸インタラクションがいくつか提案されている。Patibanda らの Life Tree [16] では、VR 空間内で呼吸エクササイズゲームを設計する上での大まかな指針を提案している。この研究では、口すぼめ呼吸を検出するための計測装置を使用している。Sra らの BreathVR [17] では、腹部に装置を取りつけることで 4 種類の呼吸 (Gale, Gust, Waft, Calm) を入力として VR ゲームに用いることを提案している。また、Tatzgern らの AirRes Mask [18] では、呼吸の流量を動的に調整するマスク型デバイスを用いて、呼吸の抵抗感を再現している。

このような VR 体験における呼吸インタラクションの研究では、VR 空間への没入感を高めるために HMD 以外にも特殊な装置を使う方法が採用されること。本研究では、これらの研究で得られた知見を参考にしつつも、手軽に実施できることを優先して、外部装置を必要としない呼吸インタラクション VR における体験の設計を試みる。

## 3. VR 吹き矢

今回実装した VR 吹き矢のプロトタイプについて述べる。VR 吹き矢は Unity\*<sup>1</sup>を用いて開発し、商用ヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) Meta Quest 2\*<sup>2</sup>で実行するアプリケーションを実装した。はじめに、体験設計の指針を示す。次に、VR 吹き矢のメカニクスを構成する呼吸検出アルゴリズムと射出ダイナミクスについて説明する。最後に、実装した VR 体験における場面構成について述べる。

### 3.1 体験設計

本実験で用いるプロトタイプでは、手軽に呼吸リハビリテーションを提供することに加えて、多くのユーザーが VR コンテンツを最後まで体験できることを重視した。以下の指針に基づきアプリケーションを実装する。

- 体験時に、矢を飛ばすという最低限の操作が出来るように、ユーザーの能力に応じてシステムを調整する。
- VR や呼吸インタラクションに慣れていなくても使用できるように、タスクやルールを複雑にしない。

### 3.2 呼吸検出アルゴリズム

これまで我々は、HMD に内蔵されたマイクを用いて、音声入力に基づく呼吸検出アルゴリズムを開発した [6]。先行研究では、入力音声に対して 5000 Hz を境に高周波領域と低周波領域のエネルギーを比較し、両方のエネルギーが一定の閾値を超えた場合に呼吸と判定した。また、そのときのエネルギーを呼吸強度とした。

本研究では、同様のアルゴリズムを用いるが、呼吸を判定する閾値をユーザーの呼吸能力に応じて動的に設定する。これは、予備検証において、あるユーザーにとっては息を強く吹くという動作をしているにもかかわらず、システム側が呼吸を検出しない課題が明らかになったためである。あらかじめ閾値を一定値に設定すると、ユーザーによって強さが異なる呼吸入力に対応できない。そこで、一連の体験の中で閾値を設定する仕組みを導入する。ユーザーの呼吸能力に応じた閾値設定の手続きは、3.4 で説明するキャリブレーションの中で行う。

### 3.3 射出ダイナミクス

一般的な吹き矢の場合、矢の射出速度は物理法則に従うため、息を吹く強さに連動する。VR 吹き矢では、VR 環境内の物体は物理エンジンに従って動くため、通常の吹き矢と同じような矢の射出ダイナミクスを再現できる。一方で、呼吸機能が低下しているユーザーが吹き矢を行う場

\*<sup>1</sup> <https://unity.com/>

\*<sup>2</sup> <https://store.facebook.com/jp/en/quest/products/quest-2/>

合、矢の射出が現実と同じ挙動を再現すると矢が的まで到達しない状況が発生する。吹き矢のコンテンツを十分に楽しむことができないと呼吸リハビリテーションとして継続的に取り組むモチベーションが低下することが予想される。そこで、本プロトタイプでは、通常の吹き矢と同じようにユーザーの息を吹く強さに連動して射出速度が変化する「連動条件」に加えて、呼気が検出された場合に必ず一定の速度で矢を射出する「一定条件」の2つの射出条件を設定した。連動条件では、マイクで計測された呼気強度に係数を掛けたものを矢の初速度とする。一定条件では、計測された呼気強度に関わらず、あらかじめ設定した初速度を矢に与える。なお今回は、この射出条件をコンテンツの体験途中で切り替えることはしない。

### 3.4 場面構成

実装に際して、3.1に示した体験設計の指針に基づいて場面を設計した。また、ユーザーがVR内の指示だけでコンテンツを一通り体験できるようなインタフェースを目指した。実際にユーザーが体験する順番に沿って、タイトル、キャリブレーション、メインゲームを説明する。

#### 3.4.1 タイトル

この場でユーザーが息を吹くと、次のキャリブレーションに進む(図1)。ここでは、VR吹き矢アプリケーションでは、コントローラを使わずに操作できる点をユーザーに伝えることを意図している。

#### 3.4.2 キャリブレーション

この場面では、3.2で述べた、ユーザーの呼吸能力に応じた呼気検出アルゴリズムの閾値設定を行う。図2aに示すようにユーザーの目の前にろうそくを表示して、炎を吹き消すように指示する。一度、ろうそくを消すと、再度炎が点火し、もう一度吹き消すように指示する(図2b,c)。炎を2度吹き消した際の呼気強度を計測し、このピークの平均値に係数を掛けたものを判定基準として用いる。2度目のろうそくを消すと、次のメインゲームに場面遷移する。



図2 キャリブレーションの様子

#### 3.4.3 メインゲーム

この場で、実際に吹き矢を行う。VR環境は室内のCGモデルを使用して構築し、ユーザーの前方約5mに吹き矢の的を設置した。スタートの指示の後、筒を表示してゲームを開始する(図3a,b)。ゲーム中は矢を5回発射し、的

にあたった位置に応じて得点(0点~10点)が獲得できる。これは、既存の吹き矢競技<sup>\*3</sup>のルールを一部参考にした。今回は、時間制限を設けず、ユーザーは任意のタイミングで矢を発射できる。図3cの様矢の発射が5回終了すると合計得点(最大50点)が表示されてゲームが終了し、タイトルに場面遷移する。

連続で吹き矢を行う場合も一度タイトルに戻り、キャリブレーションを再び行ってからメインゲームに移る。

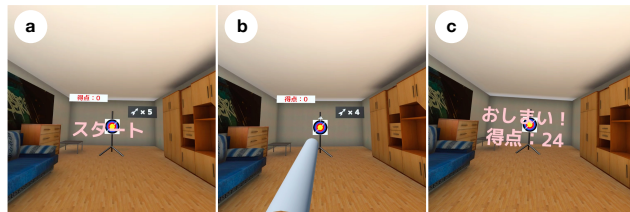


図3 メインゲームの様子

## 4. 実験

実装したプロトタイプを用いて、ユーザー体験調査のための実験を行った。実験は、2022年6月10日、11日に開催された東京大学駒場リサーチキャンパス公開2022<sup>\*4</sup>の研究室公開イベント内で実施した。十分な換気が行える開けた空間において、VR吹き矢が体験できるブースを設置した。体験中のマスク着用は任意とした。図4に体験中の様子を示す。



図4 体験ブースの様子

### 4.1 装置

実験では、VR吹き矢アプリケーションがインストールされた2台のHMD (Meta Quest 2)を用いる。それぞれのHMDには3.3で述べた射出条件「連動条件」と「一定条件」を1台ずつ設定した。アンケート回答には、iPadを使用した。HMDとiPadは毎回実験前にアルコールシートで消毒した。

\*3 <https://www.fukiya.net/fukiya/>

\*4 <https://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/news/events/2022opencampus.html>

## 4.2 手順

実験参加者は、VR 吹き矢の概要の説明を受けたあと、HMD が正面に置かれた椅子に座る。HMD を装着した状態で VR 吹き矢のコンテンツを一通り体験する。このとき、必要に応じて実験実施者が口頭で指示を行う。VR 体験終了後に HMD を外し、アンケートの回答を行う。参加者がメインゲームをもう一度体験することを希望した場合、HMD を外さずに一連の流れを繰り返し、すべての体験終了後にアンケートの回答を行う。

参加者は、あらかじめ HMD に設定された射出条件については知らされておらず、連動条件、一定条件の割り当てはランダムに行う。

## 4.3 測定データ

実験では、実験参加者のアンケート回答による主観指標とアプリケーションを介して得られる客観指標を測定する。

主観指標として、VR 吹き矢のコンテンツ体験終了後、Google Forms で作成したアンケートに回答してもらった。アンケートには 7 段階のリッカート尺度を用いた。アンケートは全 7 項目で、質問内容を表 1 に示す。

表 1 質問項目

Q1:	VR 吹き矢のゲーム体験は楽しかったか？ (1: つまらなかった - 7: 楽しかった)
Q2:	VR 吹き矢の難易度は難しかったか？ (1: 簡単だった - 7: 難しかった)
Q3:	吹いて矢を打つ操作はうまくできたか？ (1: うまくできなかった - 7: うまくできた)
Q4:	吹き矢の発射タイミングは早かったか？ (1: 遅かった - 7: 早かった)
Q5:	吹き矢の発射タイミングは、吹き方に連動していると感じたか？ (1: 連動していないと感じた - 7: 連動していると感じた)
Q6:	吹き矢の発射の力は強かったか？ (1: 弱かった - 7: 強かった)
Q7:	吹き矢の発射の力は吹き方に連動していると感じたか？ (1: 連動していないと感じた - 7: 連動していると感じた)

客観指標として、VR 吹き矢のメインゲーム中に矢を射出した際の呼気強度 (1~5 回目)、ゲーム終了時の合計得点、メインゲームの体験時間、キャリブレーションで設定した閾値を記録した。

加えて、参加者の基本情報として、性別、年齢、身長 (cm)、体重 (kg)、呼吸に関する疾患はあるか (あればその疾患名について) も回答してもらった。なお、これらのデータは個人が特定できない形で取得した。

## 5. 結果

### 5.1 実験参加者

実験参加者は、全体で 129 名 (男性 83 名、女性 46 名) である。平均年齢 29.5 歳で最年少は 6 歳、最年長は 89 歳、標準偏差は 15.87 であった。

また、射出条件別の参加者の割合は、連動条件は、65 名

(男性 43 名、女性 22 名)、平均年齢 29.8 歳で、一定条件では、64 名 (男性 40 名、女性 24 名)、平均年齢 29.2 歳であった。射出条件によって、参加者の性別や年齢に大きな偏りがないため、以降、条件間の比較にはこれらのデータを用いる。

### 5.2 主観指標

主観指標として測定したアンケート結果を図 5,6 に示す。

図 5 は、アンケートの各項目について、スコアごとの回答者の割合を示したものである。この図では色とスコアが対応しており、各項目の上段が一定条件、下段が連動条件を示す。Q1 の VR 吹き矢の楽しさについて、参加者の 80% 以上が 7 または 6 と回答している。Q2 の難易度については、70% 以上の参加者が 4, 5, 6 と回答している。Q3 の操作性に対しては、参加者の 70% 以上が 4 以上を回答している。Q4 の発射タイミングの遅延についてはおおよそ 60% の参加者が 4 を回答している。Q5 の発射タイミングの連動については、参加者の 80% 以上が 5 以上の値を回答している。Q6 の発射力の強さについては、一定条件において 80% を超える参加者が 4, 5, 6 のいずれかを回答し、連動条件において 70% 以上の参加者が 3, 4, 5 のいずれかを回答している。Q7 の発射力の連動については、一定条件では 69% の参加者が 5 以上を回答し、連動条件では 84% が 5 以上を回答している。

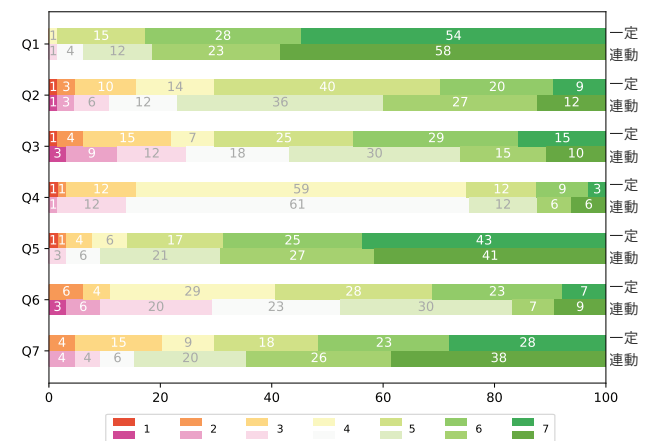


図 5 回答者の割合

図 6 は、アンケートの各項目のスコアの箱ひげ図である。射出条件によるスコアのの違いに着目すると、Q3 と Q7 において射出条件の違いによる有意差 ( $p=0.081<0.1$ ,  $p=0.064<0.1$ ) があることが示唆された。また、Q6 では連動条件のスコアが有意に小さいことが確認された ( $p=0.043<0.05$ )。

### 5.3 客観指標

客観指標として、矢射出時の呼気強度、ゲームの合計得点について結果を示す。



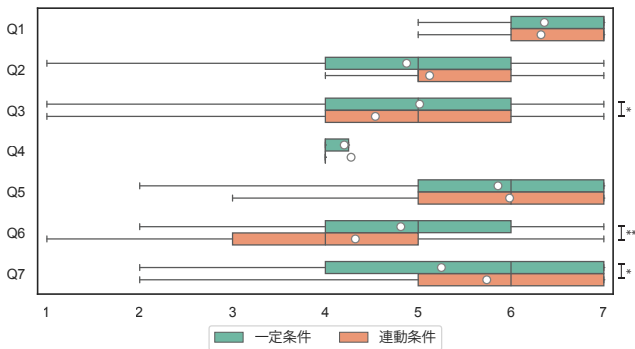


図 6 アンケートのスコア  
Note: \* $p < 0.1$ ; \*\* $p < 0.05$ ; \*\*\* $p < 0.01$

### 5.3.1 呼気強度

図 7 は、メインゲームにおける矢射出時の 1 回目から 5 回目の呼気強度を示す。それぞれ、左の赤色のグラフが連動条件、右の青色のグラフが一定条件を表している。各回の射出条件における違いに有意差はみられなかった。

吹き矢ゲーム中の呼気強度の変化を比較するため、1 回目の呼気強度に対して 5 回目の呼気強度の増加率を比較する。結果を図 8 のようである。連動条件における増加率の平均値は 1.76 (標準偏差: 2.08)、一定条件における増加率の平均値は 1.19 (標準偏差: 0.73) である。ウェルチの t 検定を行ったところ、有意差が確認された ( $p = 0.04 < 0.05$ )。

### 5.3.2 合計得点

図 9 にメインゲームの合計得点を射出条件ごとに示す。全体参加者の合計得点の平均値は 12.74 (標準偏差: 9.83)、連動条件における合計得点の平均値は 7.6 (標準偏差: 7.2)、一定条件における合計得点の平均値は 17.97 (標準偏差: 9.41) であった。ウェルチの t 検定を行ったところ、一定条件の合計得点は有意に大きいことが確認された ( $p = 1.5e-10 < 0.001$ )。

### 5.3.3 合計得点と呼気強度の関係

図 10 に、合計得点を縦軸として、横軸に参加者の呼気強度の平均値をとった散布図を示す。1 つの散布図に、連動条件と一定条件の両方のデータが含まれている。赤色が連動条件、青色は一定条件を示す。また、それぞれの射出条件について回帰直線と決定係数を示す。この結果によると、呼気強度の平均値-合計得点の関係において、連動条件は決定係数 ( $R^2 = 0.22$ )、一定条件は決定係数 ( $R^2 < 0.01$ ) であった。合計得点と呼気強度の関係は、射出条件によって異なる傾向を示す可能性があると考えられる。

## 6. 考察

今回我々が製作した VR 吹き矢のプロトタイプについて、実験結果および体験会での観察を踏まえて考察を行う。

### 6.1 設計した VR 吹き矢体験の評価

我々は手軽に呼吸リハビリテーションを提供することに

加えて、多くのユーザーが VR コンテンツを最後まで体験できることを目標にプロトタイプを開発した。今回の実験では、2 日間で 129 名、子供から高齢者まで幅広い年齢層の参加者が VR 吹き矢を体験した。体験会では、何度かキャリブレーションを行ったものの吹き矢を発射することができなかった参加者も数名観察されたため、技術的な課題は残るが、ほとんどの参加者が体験可能な VR コンテンツを実装することができた。

図 5 のアンケート結果によると、参加者の 80% が VR 吹き矢体験の楽しさについての質問項目 (Q1) に好意的な回答をしており、多くのユーザーが VR 吹き矢を楽しんだことが示唆される。難易度についての質問項目 (Q2) に対して、射出条件に関わらず 80% 以上の参加者が 4 以上を回答しており、メインゲームの難易度は低くないことが示唆された。これは、合計得点の平均値が 12.74 であることから支持される結果である。一方で、操作性についての質問項目 (Q3) では 70% 以上の参加者が 4 以上を回答しており、参加者の多くが矢の射出操作を問題なく行えたといえる。体験会中、タイトルやキャリブレーション場面において操作方法がわからない参加者に対して、実験実施者が息を強く吹くことで操作できることを説明すると、滞りなく次の場面に遷移できた光景が多く観察された。VR 内の説明が不十分であるという課題は残るが、本研究で用いた呼吸インタラクションが体験における操作性を損ねていないと考えられる。

メインゲームの設計については、ほとんどの参加者は実験実施者のルールの説明なしに吹き矢を行っていた。これは、実際の吹き矢をイメージしやすい場面設計ができていたことを示唆する。また、メインゲームを複数回挑戦する参加者が観察されたことから、得点表示などの要素も有効的に機能していたと考えられる。

以上の結果から、3.1 で示した VR 吹き矢の体験設計に基づいてアプリケーションを実装できたといえる。

### 6.2 射出条件によるユーザー体験の違い

射出条件によってユーザー体験がどのように違うのかについて、まず、図 6 のアンケート結果をみる。操作性についての質問項目 (Q3) では、連動条件のスコアの平均値が一定条件よりも小さいことから、連動条件は一定条件と比較すると操作がやや難しい傾向にあったことが示唆された。これは、有意差はみられなかったものの Q2 の傾向と一致しており、合計得点の平均値にも違いが表れている。吹き矢の射出力についての質問項目 (Q6) では、一定条件の平均値が連動条件と比較して有意に大きくなった。この結果は、連動条件では吹いた力と矢の射出速度が参加者の主観的にも一致しているが、一定条件では、吹いた力に関係なく矢が発射されるので、参加者が想定する速度よりも矢が速く射出されたと感じることがあったと推測される。吹き

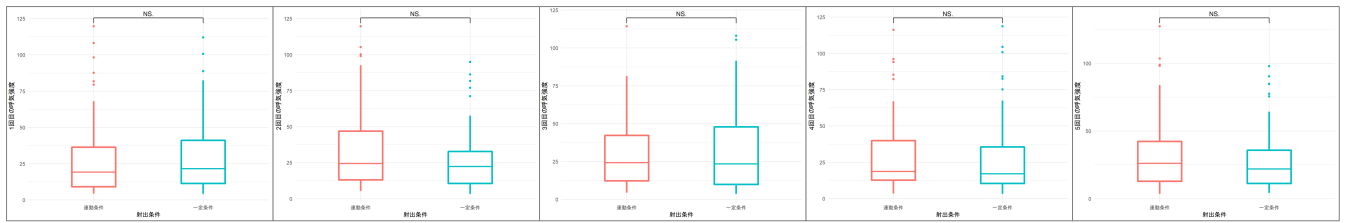


図 7 射出条件ごとの呼吸強度 (1 回目から 5 回目)

Note: \* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ ; \*\*\* $p < 0.001$

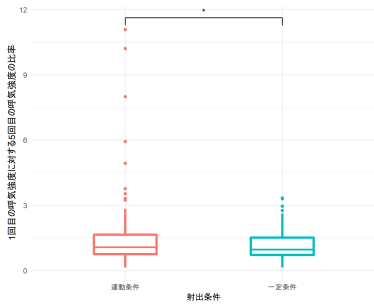


図 8 射出条件ごとの呼吸強度の比率

Note: \* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ ; \*\*\* $p < 0.001$

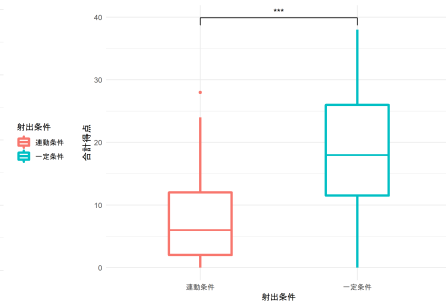


図 9 射出条件ごとの合計得点

Note: \* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$ ; \*\*\* $p < 0.001$

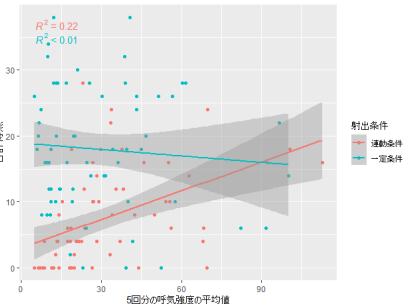


図 10 射出条件別の呼吸強度の平均値と合計得点の関係を示す散布図

矢の射出力と吹き方の連動についての質問項目 (Q7) では、連動条件の平均値が一定条件よりも有意に大きくなっている。参加者には、射出条件が違うことを明示的に説明していないにも関わらず、メインゲーム中の矢の挙動から吹いた力と矢の射出速度の関係を推定できていることが示唆された。一方で、質問項目 Q1, Q4, Q5 に有意な違いは見られなかった。これは、射出条件が VR 吹き矢の体験自体の楽しさやシステムの遅延の印象には影響を与えないことを示していると考えられる。

次に、呼吸強度や得点について比較する。図 7 によると、メインゲーム中の矢の発射 1 回目から 5 回目において射出条件による差はみられなかった。しかしながら、呼吸強度の変化に着目すると、図 8 が示すように、連動条件では 1 回目の入力呼吸強度と 5 回目の入力呼吸強度で平均して 1.7 倍以上の増加がみられ、一定条件と比較して有意に大きい。これは、吹き矢の射出力についての質問項目 (Q6) と吹き矢の射出力と吹き方の連動についての質問項目 (Q7) のアンケート結果が示唆するように、参加者がメインゲーム中の矢の挙動から吹く息の強さを調整したために生じた可能性が考えられる。メインゲーム終了後の合計得点については、射出条件によって異なった。連動条件の合計得点の平均は 7.6 で一定条件と比較して有意に小さい。今回のルール設計では、一度に最大で 10 点獲得できるが、平均値からみても連動条件の難易度が高かったことが示唆される。実際に、参加者によっては合計得点が 0 点で終了することもあった。このような場合、ユーザーが VR 吹き矢の難易度が高いと感じてしまい、使用するモチベーションを低下させる可能性もあることが懸念される。

以上のことから、射出条件の違いがユーザーの VR 吹き矢体験における難易度や操作性の感じ方の違いに影響を与え、合計得点の形で客観的にも差があることを確認した。さらに、ユーザーはメインゲーム中の矢の発射挙動によって息を吹く強さを調整していることが示唆された。連動条件では得点や射出の難易度など何らかの要因が息を強く吹くことを誘発していると考えられる。これは射出条件の違いによってユーザーの行動を誘導できる可能性を示唆する。

### 6.3 今後の展望

今回、体験設計に基づいて実装したプロトタイプがある程度 3.1 での想定通りの体験を提供できたことを確認した。また、射出条件によってユーザー体験に影響を与える要素と与えない要素が明らかになった。特に、難易度は射出条件によって大きく異なることが示唆された。ユーザーの呼吸能力によって適切な難易度の吹き矢を提供することは、継続的な呼吸リハビリテーションへのモチベーション維持につながるため重要である。これは同時に、難しすぎるアプリケーションは、モチベーションを低下させてしまう可能性があることを意味する。今後は、本研究で得られた知見に基づいて、ユーザーの能力に応じた細やかな難易度の設計を検討する。例えば、呼吸機能が低いユーザーの最初期は難易度の低い一定条件を用いた吹き矢で操作に慣れてもらい、徐々に連動条件に移行していくという方法で負荷を調整することで、効果的な呼吸リハビリテーションが提供できるのではないかと考えられる。

呼吸検出の閾値調整を行うキャリブレーション場面の実装などによって、老若男女幅広いユーザーに VR 吹き矢を

提供することができた。しかしながら、今回の実験参加者の年齢は平均 29.5 歳であり、ほとんどが呼吸の疾患がない。今後は、呼吸リハビリテーションの効果を検証するために、高齢者や呼吸疾患がある患者に対象を限定した実験を実施する必要がある。

継続的なリハビリテーションを提供する上では、中長期的な視点から体験の設計を行う必要がある。本実験では、多くの参加者がメインゲームを一度しか行っていないため、複数回の体験による影響は定かではない。呼吸機能の改善を目的に呼吸リハビリテーションを行う場合、例えば、週 3 日程度、2 ヶ月間継続して VR 吹き矢を使用することが想定される。このような中長期間において、VR 吹き矢をどのように活用して楽しく呼吸リハビリテーションを実施するかについては、リハビリテーション医や言語聴覚士、高齢者施設や医療施設などの現場と連携して、技術的な課題以外にも総合的な観点から検討する必要がある。

## 7. おわりに

本研究では呼吸リハビリテーション活用に向けて、VR 吹き矢のプロトタイプを実装し、実験によってユーザー体験の調査を行った。本研究で得られた知見を踏まえ、今後は呼吸機能が低下した高齢者や肺の疾患をもつ患者を対象にした継続的な評価を行っていく予定である。

**謝辞** 本研究は、株式会社ユニマット リタイアメント・コミュニティの支援および、JST ERATO JPMJER1701 の支援を受けています。

## 参考文献

- [1] 解良武士, 河合恒, 平野浩彦, 渡邊裕, 小島基永, 藤原佳典, 井原一成, 大淵修一. サルコペニアがピークフローに与える影響. 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌, Vol. 28, No. 2, pp. 298–302, 2019.
- [2] Romain A Pauwels and Klaus F Rabe. Burden and clinical features of chronic obstructive pulmonary disease (COPD). *Lancet*, Vol. 364, No. 9434, pp. 613–620, 2004.
- [3] Elisabetta Zampogna, Mara Paneroni, Stefano Belli, Maria Aliani, Alessandra Gandolfo, Dina Visca, Maria Teresa Bellanti, Nicolino Ambrosino, and Michele Vitacca. Pulmonary rehabilitation in patients recovering from COVID-19. *Respiration*, Vol. 100, No. 5, pp. 416–422, March 2021.
- [4] 永崎孝之, 岡田裕隆, 甲斐悟, 高橋精一郎. 吹き矢を用いたトレーニングが呼吸機能に及ぼす影響—呼吸筋トレーニングとの比較—. 理学療法科学, Vol. 25, No. 6, pp. 867–871, 2010.
- [5] 河島猛, 山本洋史, 岩田裕美子, 森下直美, 宗重絵美, 平賀通, 松村剛, 豊岡圭子, 藤村晴俊. 神経筋疾患に対するスポーツ吹き矢を用いた呼吸リハビリテーションの有効性について. 理学療法学 Supplement, Vol. 2009, pp. D4P2238–D4P2238, 2010.
- [6] 山野孝太, 佐々木智也, 宮崎敦子, 登嶋健太, 檜山敦. VR 吹き矢: 呼吸検出を用いた呼吸リハビリテーション. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム論文集, 第 2021 巻, pp. 322–328, aug 2021.
- [7] 馬屋原康高, 関川清一, 河江敏広, 曾智, 大塚彰, 辻敏夫. 咳嗽力評価の臨床的意義と今後の研究. 理学療法の臨床と研究, Vol. 28, p. 9, 2019.
- [8] 加賀谷斉. 摂食・嚥下障害に対する呼吸リハビリテーションの適用. 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌, Vol. 21, No. 1, pp. 9–12, 2011.
- [9] 菅原慶勇, 高橋仁美, 清川憲孝, 笠井千景, 渡邊暢, 藤井清佳, 加賀谷斉, 本間光信, 佐竹将宏, 塩谷隆信. COPD 患者の吸気筋力からみた呼吸リハビリテーションの効果. 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 251–255, 2005.
- [10] 三浦宏子, 大澤絵里, 野村真利香, 玉置洋. オーラル・フレイルと今後の高齢者歯科保健施策. 保健医療科学, Vol. 65, No. 4, pp. 394–400, 2016.
- [11] 石川優, 浦野幸, 于沛超, 星野准一. 2-5 吹き矢の楽しさを増強する vr 空間の提案 (第 2 部門 vr 関連技術とその応用). 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, Vol. 2012, , 2012.
- [12] 澤田枝里香, 淡路達人, 森下圭介, 古川正紘, 有賀友恒, 木村秀俊, 藤井智子, 武市隆太, 清水紀芳, 井田信也, 常磐拓司, 杉本麻樹, 稲見昌彦. 風を利用した入出力インタフェース: ビュー・ビュー・view(「テレレイマージョン」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 3, pp. 375–383, 2008.
- [13] 坂内祐一, 奥野泰弘, 角田弘幸, 高山知彦, Others. MR 用呼吸インタフェースの開発とインタラクティブ・アートへの応用. 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 7, pp. 1594–1602, 2005.
- [14] Takahiro Kusabuka and Takuya Indo. IBUKI: Gesture input method based on breathing. In *Adjunct Publication of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20 Adjunct, pp. 102–104, New York, NY, USA, October 2020. Association for Computing Machinery.
- [15] Jong-Hyun Kim and Jung Lee. Controlling your contents with the breath: Interactive breath interface for VR, games, and animations. *PLoS One*, Vol. 15, No. 10, p. e0241498, October 2020.
- [16] Rakesh Patibanda, Florian 'floyd' Mueller, Matevz Leskovsek, and Jonathan Duckworth. Life tree: Understanding the design of breathing exercise games. In *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp. 19–31. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, October 2017.
- [17] Misha Sra, Xuhai Xu, and Pattie Maes. Breathvr: Leveraging breathing as a directly controlled interface for virtual reality games. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [18] Markus Tatzgern, Michael Domhardt, Martin Wolf, Michael Cenger, Gerlinde Emsenhuber, Radomir Dinic, Nathalie Gerner, and Arnulf Hartl. Airres mask: A precise and robust virtual reality breathing interface utilizing breathing resistance as output modality. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.