

VR 吹き矢：呼気検出を用いた呼吸リハビリテーション

山野 孝太¹ 佐々木 智也¹ 宮崎 敦子¹ 登嶋 健太¹ 檜山 敦¹

概要：呼吸、咳嗽能力の低下した高齢者への効果的なリハビリテーションとして吹き矢が期待されているが、大掛かりで場所を取ってしまう点が継続する上での弊害となる。バーチャルリアリティを用いて、VR 空間上で簡単に吹き矢の体験ができれば、より実用的なリハビリテーションが期待できる。本研究では、HMD 単体を用いて吹く動作を検出して吹き矢が体験できる、VR 吹き矢を提案する。本稿では、HMD 付属マイクロフォンによる呼気強度の計測手法の提案、呼吸機能及び空間認知能力の向上を目指したタスクデザインの検討の 2 つを行う。1 つ目は被験者の呼吸音のデータを解析し、提案手法で呼気の検出及び強度の測定が行えることを検証する。2 つ目は提案した VR 吹き矢タスクの有用性を、ユーザーの主観的フィードバックを通して検討する。介護、医療施設に入所している高齢者に質の良い VR 吹き矢を提供することで、心身の健康の増進に大きな役割を果たすことが期待される。

1. はじめに

呼吸筋力や最大呼気流速 (PEFR: peak expiratory flow rate) は加齢によって衰えることがよく知られている [1]。呼吸機能のトレーニングには様々なものがあるが、加齢によって呼吸機能の低下した高齢者や呼吸能力に障害を持つ患者に対して、吹き矢がリハビリテーションやレクリエーションの目的で行われる事がある [2],[3],[4]。吹き矢の一連の基本動作は 1. ゆっくりと深呼吸をする, 2. 息を吐ききってから大きく息を吸う, 3. 筒を的に向けて狙いを付ける, 4. 一気に息を吹いて矢を飛ばす, という流れになっていて、うまく矢を飛ばすには正しい横隔膜呼吸と PEFR が重要になる。特に 4. の息を吹く動作が咳嗽能力の向上につながると思われる、実際に吹き矢によって PEFR が向上することが確かめられている [4]。

しかしながら、吹き矢自体は本来リハビリテーションを主眼に置いていない遊戯である。専用の器具や的からプレーヤーまでのスペースが必要であり、安全性を確保するためにも吹き矢をする場所は限定されてしまう。以上の点から吹き矢は呼吸機能のトレーニングとして一定の効果が期待されるものの、高齢者施設や医療施設などでリハビリテーションを日常的に行うという観点では課題がある。

そこで、本研究ではこのような従来の吹き矢実施における課題を解決するアプローチとしてバーチャルリアリティ (VR) 技術に着目し、VR 吹き矢を提案する (図 1)。本研究で提案する VR 吹き矢システムではリハビリテーションの継続性に主眼をおくため、ヘッドマウントディスプレイ



図 1: 呼気検出を用いた VR 吹き矢

レイ (HMD) 単体で動作する。HMD に付属するマイクロフォンの入力信号から呼気をセンシングし、VR 空間上で吹き矢を飛ばすインタラクションを実装する。

本稿では二つの観点から VR 吹き矢の提案および評価を行う。第一に HMD マイクへの音声入力信号を用いた呼気音の検出及び呼気強度の推定手法の提案である。呼気に連動して吹き矢が飛ぶという機能を HMD 単体を用いて実装する上で想定される課題を解決する。第二に呼吸能力と空間認知能力をトレーニングできるタスクについてプロトタイプを実装して評価する。提案する呼気検出手法を用いた VR 吹き矢システムを被験者に体験してもらい、フィードバックをもとにトレーニングタスクの有用性を検討する。

2. 関連研究

2.1 呼吸機能トレーニングと吹き矢

呼吸機能、特に咳嗽能力の低下は、唾液や食物が気管に

¹ 東京大学

誤って入ることで起こる誤嚥性肺炎のリスクを高めることにつながる。健常者であれば誤嚥してしまったとしても咳嗽反射によって異物を外に排出できるが、高齢者の場合には咳嗽反射が低下していることが多く、そもそも嚥下能力も低下している [5]。そのため高齢者の肺炎の多くは誤嚥性肺炎であり、呼吸能力のトレーニングによって咳嗽能力を保つことは重要な意味を持つといえる [6]。

喘息患者などの気管支に障害のある患者や高齢者などに対しては、口すばめ呼吸と横隔膜呼吸が推奨されることがある [7]。口すばめ呼吸は息を吐く際に口をすばめることで抵抗を与える呼吸法のこと、通常の呼吸よりも気管支の内圧を高めて広げることができ、結果として効率よく呼吸ができると考えられている。横隔膜呼吸は腹式呼吸とも呼ばれる呼吸法で、横隔膜を十分に上下させて呼吸を行うことで肺の換気量を向上させることができる。

吹き矢を上達するためには特に横隔膜呼吸を身につけることが重要とされており、正しい指導のもとで吹き矢を行うことは咳嗽能力の向上のみならず、横隔膜呼吸の習得につながると思われている。呼吸筋力や PEFR が向上することで咳嗽能力が向上すると考えられるため、吹き矢は誤嚥予防という観点で有用なトレーニングであるといえる。また、呼吸機能リハビリテーションとして効果を上げるには継続的に負荷のある訓練をすることが必要であるが、吹き矢には競技性や遊びの要素があるためトレーニングを継続する上でのモチベーションにもつながる。

2.2 呼吸インタラクションと VR リハビリテーション

インタラクティブな吹き矢システムを実装する方法には様々な選択肢がある。例えば、プロジェクタによって投影された VR 空間と吹き矢型デバイスを用いたシステムが考案されている [8]。また息を検知する吹き矢型デバイスを用いることで呼吸をインタフェースとして用いる研究は吹き矢に限らずいくつか取り組まれているが [9],[10]、マイクのみを用いて息を認識し、強度を推定するようなシステムは十分に研究されていない。HMD 単体で吹き矢を体験できるシステムが構築できれば従来の吹き矢にあった物理的制約を取り払うことができる。場所や姿勢の制限無しにあらゆる状況で呼吸機能トレーニングを行うことができ、矢を込める動作などを省いたりすることでトレーニング性や遊戯性に関わる部分のみを抽出して実装できる。

VR を活用することで従来の吹き矢体験を拡張し、呼吸機能以外のトレーニングも複合的に行うことも可能となる。VR を用いたリハビリテーションに関する例として、視空間機能についての認知テスト及び認知刺激タスクを行っている研究 [11] や空間ナビゲーション機能を測定する研究 [12],[13] などがある。脳卒中などによる後遺症を持つ患者や初期の認知症患者では嗅内野及び海馬で組織変化が起こり、視空間機能が低下することが知られている [14]。

これらの患者だけでなく健康な高齢者であっても予防の観点から視空間機能の評価やトレーニングを行うことは有用である。従来研究では 2 次元ディスプレイ上でのタスクを使用することが多く、高齢者が生活する上で遭遇する状況とは乖離がある。一方で、没入感のある VR 空間を活用することで実際に必要なスキルと関連のあるタスクを設計できると考えられる。VR 吹き矢では VR 空間上に自由の的に配置できるという点で視空間機能タスクと相性がよく、自然に呼吸機能と空間認知能力の両方を改善する複合的リハビリテーションを実現することが期待できる。

2.3 マイクロフォンによる呼吸測定

VR 吹き矢を実装するにあたり、素早く動作してリアルタイムに呼気の検出と強度推定ができることが要求される。また吹き矢を飛ばそうとする息を吹いた時だけ反応して、その他の音には反応しないということも実用上のシステムとしては重要になる。マイク入力を用いて呼吸を検出する手法についていくつかの先行研究 [15],[16] があり、大まかな方向性としては信号の強度を用いる手法と、それ以外の特徴量を用いる手法がある。信号の強度を用いる手法はブレスマイクスイッチのような既存の呼気による入力装置にも使われており、主に信号の強度が閾値を超えたかどうかで呼気を検出する。非常に簡単な処理で実装できる利点があるが、エネルギーの高い利用者の声や環境音によって誤って反応してしまうという課題がある。それに対して信号にフーリエ変換などを行なって抽出した特徴量を用いる手法は音声認識などで一般的に用いられる手法であり、様々な種類の音を分類することが可能である。呼気の強度推定については [15] によって呼吸の音響信号のエネルギーと時間の積が肺活量と相関していることが示されている。

3. 提案手法

3.1 呼気の検出と強度推定

今回提案する手法では、呼気音の特徴的なパワースペクトルに着目することで呼気の検出を容易にした上で、入力信号のエネルギーを瞬間的な呼気の強度として用いる。本研究で扱う呼気音は吹き矢を吹くように口をすばめた状態で強く息を出す際に生じる音である。子音の“f”と発声原理がよく似ていて、唇の隙間を小さくすることで空気が通りにくくなったところを呼気が通過することで生じる摩擦音であると考えられる。これは一般に呼気音あるいは呼吸音と呼ぶ際の気道内の乱流によって生じる音とは異なる。対象の呼気音に関しては全周波数領域に渡ってエネルギーを持つようなスペクトルになる一方で、通常の声に主に含まれる有声音では殆どのエネルギーは 5000 Hz 以下の低周波数領域に存在する。

予備実験にて録音した呼気音と声について時間周波数解析をした結果を図 2, 3 に示す。解析結果より、入力信号を

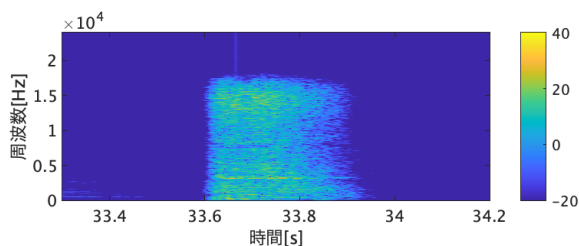


図 2: 呼気のスペクトログラム

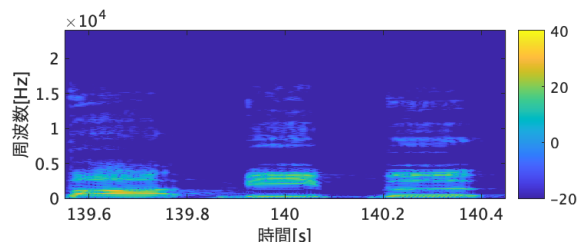


図 3: 声のスペクトログラム

時間窓で切り出した信号についてパワースペクトルを計算して高周波領域のエネルギーを求めることで呼気音と有声音の区別ができるのではないかと考えた。また人の声に含まれる摩擦音や破裂音などの子音については 5000 Hz 以上の周波数領域でもエネルギーを持っているが、子音が発声している時間のごく僅かであるため時間窓を適切に長くすることで影響を減らすことが期待できる。

3.2 VR 吹き矢システム

本研究で提案する VR 吹き矢は、最終的には呼吸機能及び空間認知能力を向上させるリハビリテーションとして使用できることを目指す。そのためには必ずしも現実の吹き矢を完全に再現する必要はなく、むしろリハビリテーションをする上で有用な特徴のみを抽出して実装することが望ましい。まず呼吸機能の観点からは、できるだけ呼気を強く吹かせるようなデザインにすることが重要である。現実の吹き矢では強く息を吹こうとすると、呼気を出すときの抵抗感や矢が発射される時の解放感が強くなったり矢速が上がって着弾時の衝撃音が大きくなるなどのフィードバックが得られる。また強い呼気で飛ばすことで安定して良い得点を得やすくなるという特徴がある。VR 吹き矢において吹き矢型デバイスのような HMD 以外の装置を使用しない場合には物理的なフィードバックを与えることは難しいが、視覚的あるいは聴覚的なエフェクトを出すことで呼気の強さに応じたフィードバックを現実の吹き矢より楽しく分かりやすくすることが可能である。次に空間認知能力の向上については、VR 空間上に広がりをもって配置したオブジェクトを探して吹き矢を当てるといったタスクが十分有効であると考えた。先行研究 [11] にあるような複雑な空間認知課題も考えられるが、リハビリテーションとしての継続しやすさという観点からできるだけシンプルでモチ

ベーションを損なわないことを重視した。

以上のことから、本研究で用いる VR 吹き矢システムは次のような仕様を定めた。1. 参加者が HMD を装着して正面に向かって強く息を吹くと口元から矢が顔を向けている方向に向かって発射されて効果音が出る、2. また呼気の強度に応じて矢速は速くなる、3. 矢は放物線を描いて飛翔して他のオブジェクトに当たると着弾の効果音及び視覚的なエフェクトが出る、4. 的となる球体は正面に限らずに上下方向、横方向に広がりをもった領域上でランダムに出現または消失する。

4. 実験

提案手法を評価する 2 つの実験を行う。実験 1 では、呼気検出手法の検出精度の計測。実験 2 では、試作した VR 吹き矢のタスクデザインについて評価を行う。

4.1 実験環境

本実験では、実験用のアプリケーションを製作し、HMD に Oculus Quest2 を使用する。被験者は、研究室構成員 7 名 (sub2-sub8, 全て男性で年齢は 20 代) で、音声サンプルの均一性を保つために全ての被験者に対して同じ日に同じ場所で実験を行う。被験者は椅子に座って Oculus Quest2 を装着した状態で、それぞれのタスクを行う。実験内容は実験開始時に口頭で説明したほか、実験中の VR 画面上に実行中のタスクの指示を常に表示する。各被験者の音声信号は、Oculus Quest2 付属マイクを用いてサンプリング周波数 48000 Hz で録音し、録音したデータは MATLAB で解析する。

本実験での全てのタスクは 1 つのアプリケーションの中で実装していて、VR 空間に表示されるボタンに吹き矢を当てることによって被験者が自分で操作できる (図 4)。タ



図 4: 実験時の画面の様子

スク以外の部分でも吹き矢を使うことで、被験者が少しでも息を吹くという動作に慣れることを意図している。実験の進行の際には被験者自身に実験1で録音するモードと実験2のVR吹き矢ゲームのモードを切り替えさせる。ただし実装時点では入力信号のエネルギーが閾値を超えたときに矢が発射されて、エネルギーが大きいほど矢が早く飛ぶという仕様であるので、声ではなく強く呼吸を出して矢を飛ばすように指示する。

4.2 実験1：呼吸検出精度の評価

4.2.1 実験手順

この実験は2つのタスクで構成されている。1つ目のタスクは4段階の強さの息を吹き分けるというもので、被験者には視界中央に表示される「弱」、「中」、「強」、「最強」の語に応じたレベルの強さの息を吹くように指示した。息強度のレベルはこの順番に1語ずつ3秒おきに表示されて、それを11周分繰り返させた。ここで表示順をランダムにしているのは、呼吸の強度を吹き分けるのは被験者にとって難しいタスクであり、表示順を揃えることで被験者がうまく強度を吹き分けた音声信号が得られると考えられたためである。また、被験者がタスクに慣れるまでの間のデータの異常なばらつきを排除するために最初の3周分のデータは除いて8周分、合計32回分の息のデータを解析に用いた。2つ目のタスクでは3秒おきに視界中央に表示される文字をはっきりと声に出して読むように被験者に指示をした。表示される文字は「あいうえお」「かきくけこ」「さしすせそ」「たちつと」「はひふへほ」「ぎじずぜぞ」「びびぶべぼ」「びびぶべぼ」「らりるれろ」で、この順番に2周表示した。これらの語は母音と事前実験において誤検出する可能性が高いと予想された子音を含んでいる。全ての被験者に対して一連のタスクを口元に何もつけないマスクなし条件とマスク着用条件でそれぞれ行った。

4.2.2 結果

まずマスクを付けない条件の信号に対してオーバーラップ率90%で長さ2400のハミング窓をかけて時間周波数解析を行った。図5に元波形とパワースペクトルの例を示す。呼吸の音では低周波数領域でも高周波数領域でもパワーをもったスペクトルが得られるのに対して母音では5000Hz以上の高周波数領域ではパワーがかなり小さくなったスペクトルとなっている。また殆どの子音では特に低周波数領域でのパワーがかなり小さくなっているということも分かった。そこで窓関数をかけたそれぞれの信号について5000Hz以上の領域での高周波数エネルギーと5000Hz以下の領域での低周波数エネルギーを変数として、呼吸とそれ以外を分類する問題としてMATLABで用意された学習器を使用して解いた。学習器にかける対象には、時間窓をかけた状態でエネルギーが1以上の信号を選んで呼吸または声のラベルを割り当てた。得られた呼吸のラベルを付け

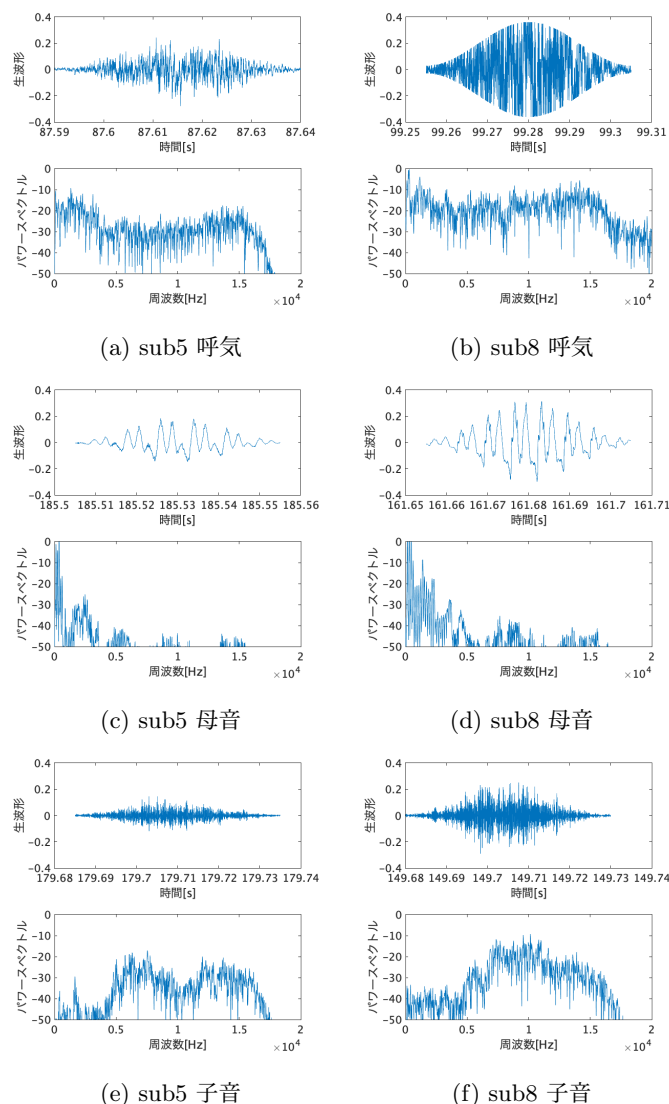


図5: 得られたスペクトルの例。上側の図が窓関数をかけた生波形で下側の図はそのパワースペクトル。

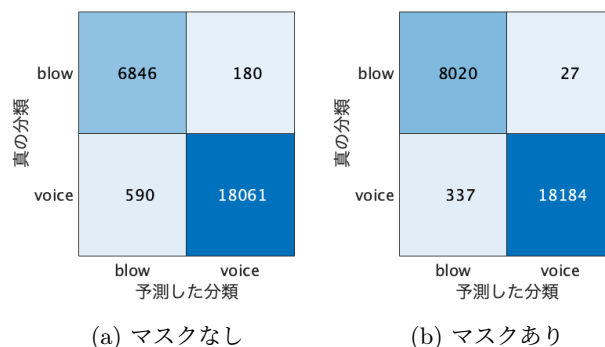


図6: 学習器を用いた呼吸の検出精度

た変数 7026 組と声のラベルを付けた変数 18651 組について 10 最近傍分類アルゴリズムを用いて学習させたところ、97.0%の精度で推定できた。また全変数について学習したモデルで推定した結果を図 6a に示す。同様の手法を用いてマスクを付けた条件の信号についても学習を行なったところ 98.6%の精度で推定でき、その結果を図 6b に示す。

4.2.3 考察

本研究の被験者は全て 20 代の男性であるため、性差バイアスや年齢差バイアスが存在する可能性があり、今後、男女両方を含む高齢者を対象にした実験を行うことが不可欠である。特に高齢者の場合には口唇の筋力が衰えているために口をすぼめることが難しいということがあり、若年者と比べて呼気信号のエネルギーが小さくなってしまい、検出が困難になってしまう可能性がある。実際に本研究の被験者の中だけでも図 7 に示すように低周波、高周波領域でのエネルギーの分布の特徴が異なっていて、個人差が大きいことが分かる。実用面を考慮する上で、今回の実験では「表示された強さの息を吹く」という必要最低限の指示にとどめていた。被験者の解釈によって口の形や息の吹き方、強さといった特徴がかなり異なっていたため、このようなばらつきが大きくデータに反映されてしまったと考えられる。一方で、そのような条件でも呼気の認識ができたという点で提案手法の頑健性が示唆された。

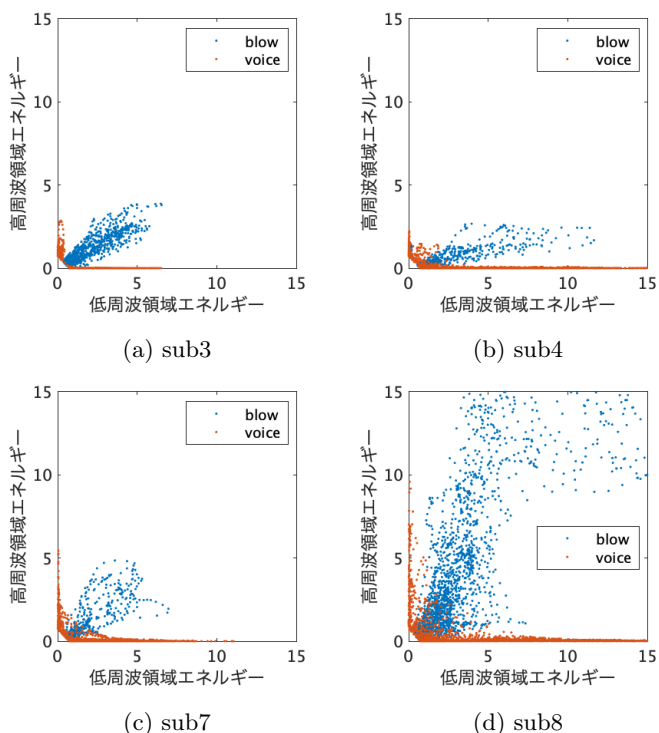


図 7: マスクなしの条件での被験者 4 人の呼気音と声のエネルギー分布

本実験で使用した音声データは 15000 Hz 以上の周波数帯領域でのエネルギーが格段に弱くなってしまっている

という問題があり、マイクロフォンの周波数特性または Oculus Quest2 自体の内部処理が原因だと考えられる。どちらにせよ今回の実験条件で得られた信号はデバイスに依存しているため、他の機器を用いた実装を考える際にはその機器に合わせた調整が必須となる。

提案手法では、ある周波数でスペクトルを分割して求めた高周波エネルギーと低周波エネルギーを変数とすることで 2 変数の分類問題に単純化して考えていた。これは実際のスペクトルの情報をかなり落としてしまっているため、推定精度を向上させるためにはエネルギー以外の特徴量を用いる手法が有効な可能性がある。例えば、メル周波数ケプストラム係数のような特徴量を用いると言った手法が考えられる [17]。

4.3 実験 2：VR 吹き矢のタスク評価

4.3.1 実験手順

この実験では VR 空間上で前方のランダムな位置に黄色の的球が 1 つずつ合計 10 個表示されるタスクを用いる。被験者にはこれらの的球を探してできるだけ多くの的球に矢を命中させるように指示をした。的球に矢を当てると色が赤に変わるため、的中したことが容易に分かるようになっている。体験が終わった後に口頭で被験者に感想を求めて、試作したタスクの評価を行う。

4.3.2 結果

タスクについては以下のような評価が得られた。

- 吹いていて楽しい。
- 吹いても飛ばない時があった。
- 強く吹いた時と弱く吹いたときの差が分かりにくい。
- 息を吹くのに疲れた。
- フィードバックが不十分だった。
- 直感的で分かりやすいインターフェースである。
- 難易度が簡単過ぎた。

多くの被験者で楽しいという感想が得られていて、吹き矢の遊戯性についてはある程度再現ができていたといえる。ただし殆どの被験者は実際の吹き矢の経験が無かったため、実際の吹き矢と比較してどうかという観点の意見が得られていないため、今後は VR 吹き矢と実際の吹き矢の両方を体験させて比較する実験を行うことも重要である。吹いても飛ばない、強く吹いたときと弱く吹いたときの差が分かりにくいという感想については、入力信号の強度だけを測って呼気の強度とみなしていたためであると考えられる。これについては 4.2 節で得られたような結果を用いた手法を実装することで改善できる見込みがある。被験者によっては息を吹くことでかなり疲れていた。これは特に 4.2 節の実験の中で 3 秒おきという短いスパンで連続して息を吹き続けたことに対する感想だと思われる。被験者の間で疲労感には大幅な違いがあったが、呼気の強度の指示

について各自の受け取り方が異なっており全力で息を吹いていた被験者とそうでない被験者がいたことが原因だと思われる。呼吸の強度を得点に反映させるなどしてモチベーションを与えるとともにできるだけ強く息を吹くように指導することで呼吸機能のトレーニングができると考えられる。一方でフィードバックが不十分だったという感想もあった。これは息を吐く際の物理的な感覚としてのフィードバックとVRのフィードバックとの両方を指していると思われる。前者に関してはHMDだけを用いる手法では根本的に解決できない問題であり、現実の吹き矢により近づけるには吹いている感覚を提示できるデバイスが必要になる。しかし提案したVR吹き矢システムでも遊戯性と呼吸機能訓練の性質は実現できることが示唆されたため、呼吸機能のリハビリテーションという観点からは必ずしも現実の吹き矢を再現しなかったとしても効果があるといえる。後者に関しては着弾する度に呼吸の強度に応じた得点を表示したりより派手なエフェクトを付けるなどゲームとしての設計の部分での改善をすることで現実の吹き矢とは異なるベクトルで楽しませることができると考えている。また、吹き矢を使ってなにか操作をするというインタフェースについて高評価している感想がいくつか得られた。

被験者に与えたタスクには空間認知課題としての側面も与えることを意図して設計していたが、その点についての感想はあまり得られなかった。難易度が簡単すぎたという意見があったが殆どの被験者にとって、空間認知課題の観点からは簡単なゲームになっていて訓練の効果はなかったと思われる。本研究の被験者は若くゲームやHMDに対してもある程度慣れている人が多かったと思われるが高齢者を対象にした実験でも難易度が不適切であるのかは確かめる必要がある。より複雑な空間認知課題としての側面をもたせるには、例えば複数のオブジェクトを空間に同時に出して、的球だけを探し出して的確に吹き矢を当てるようにしたり、オブジェクトを運動させたりといったことが考えられる。

5. 今後の展望

本研究によって収集したデータに対して呼吸の検出がうまく行えることが示され、提案手法によってHMD単体で呼吸流量を測定できることが示唆された。今後はスパイロメトリーを使用したデータとの比較などを行う必要がある。先行研究[15]では身長や年齢といった条件によっても呼吸流量が変わるということが示唆されているため、そういった被験者個別の要素を考慮しつつ呼吸信号エネルギーと特にPEFRなどの指標との相関を調査することが望ましい。またそのような調査が進めば呼吸音の解析を更に発展させて、肺機能の異常検知などができる可能性がある。呼吸によって空気が気管支を通る音の異常を検知する研究はすでに行われている。唇の間を通る呼吸音から異常検知を試み

る研究は少ないが、スパイロメトリーで典型的に異常を検知する判断基準があり、マイクによる呼吸認識でも同様の基準を考えられる可能性がある。

本研究の最終的な対象は主に高齢者であるため、高齢者に対して同様の実験を行ってデータの収集と提案手法の検証を行う必要があるといえる。実際に高齢者にVR吹き矢を体験してもらうことで、PEFRや視空間認知が改善するのかを評価し、リハビリテーションとして活用できるのかを検証することが今後の展望である。

操作の簡便性と、現実とシームレスにつながるインタラクションとしての側面があることから息を吹くことによって操作するユーザインタフェース(UI)として利用できる可能性が示された。HMD着用状態でのUIとしては手に持つタイプのコントローラーのボタンやスティックを押す、コントローラーを動かす、視線を対象に一定時間合わせる、音声コマンドによって操作するなどが挙げられる。コントローラーを用いる操作では、HMDを装着した状態では手元を直接見ることができないため操作に慣れが必要である。視線を対象にあわせる方法はコントローラーを一切使用しないため簡単なUIではあるが、操作のフィードバックを装着者に与えることが難しく、UIのインタラクティブ性は低い。音声コマンドによる操作は分かりやすく直感的ではあるが、現状では音声を認識するまでのタイムラグが不可避である。対象に向かって息を吹くことで操作するUIの場合、息を吹くこと自体がある程度感覚のフィードバックを与えていてコントローラーを用いずに身体的で直感的な操作がタイムラグなしに実現できる。

6. おわりに

本研究では、呼吸機能と空間認知能力の向上させるリハビリテーションとして使用を目指したVR吹き矢を提案した。HMD単体でVR吹き矢システムを実装するためのマイクによる呼吸の検出と強度を推定する手法を提案し、実際に測定したデータから高い精度で検出が行えることを示した。実装したVR吹き矢のタスクについて被験者からフィードバックを得ることで実際の吹き矢の代わりとして呼吸機能のリハビリテーションに活用できる可能性が示唆された。またゲームの内容をより複雑にして空間認知課題としての側面を持たせることで現実の吹き矢を超える体験にできる可能性がある。今後は高齢者を対象として提案したVR吹き矢システムが呼吸機能及び空間認知能力に影響を与えるかを検証する。

謝辞 本研究の一部は、株式会社ユニマツ リタイアメント・コミュニティ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] 永崎孝之, 岡田裕隆, 甲斐悟, 高橋精一郎. 吹矢を用いたトレーニングが呼吸機能に及ぼす影響. 理学療法科学, Vol. 25, No. 6, pp. 867–871, 2010.
- [3] 山本進. 鯖江市における「エンターテインメントリハビリテーション」の取り組みについて. 理学療法学 Supplement, Vol. 2006, pp. E1084–E1084, 2007.
- [4] 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.
- [5] 大前由紀雄. 高齢者の嚥下障害の特徴. 音声言語医学, Vol. 54, No. 3, pp. 167–173, 2013.
- [6] 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.
- [7] 宮川哲夫. 呼吸リハビリテーション. 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌, Vol. 5, No. 3, pp. 119–126, 1996.
- [8] 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. 2, No. 5, pp. 1–2, 2012.
- [9] 坂内祐一, 泰弘奥野, 弘幸角田, 知彦高山. Mr 用呼気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, jul 2005.
- [10] 小坂崇之, 岩本拓也, 服部元史. 飲食物摂取による口臭変化を入力としたゲームシステムの開発 (<特集>香り・人・システム 2). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 1, pp. 5–16, 2014.
- [11] Štefan Korečko, Marián Hudák, Branislav Sobota, Martin Marko, Barbora Cimrová, Igor Farkaš, and Roman Rosipal. Assessment and training of visuospatial cognitive functions in virtual reality: proposal and perspective. In *2018 9th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, pp. 000039–000044, 2018.
- [12] Konstantine K. Zakzanis, Genevieve Quintin, Simon J. Graham, and Richard Mraz. Age and dementia related differences in spatial navigation within an immersive virtual environment. *Medical Science Monitor*, Vol. 15, No. 4, pp. 140 – 150, 2009.
- [13] Angela M. Rizk-Jackson, Summer F. Acevedo, Dean Inman, Diane Howieson, Theodore S. Benice, and Jacob Raber. Effects of sex on object recognition and spatial navigation in humans. *Behavioural Brain Research*, Vol. 173, No. 2, pp. 181–190, 2006.
- [14] Giuliana Klencklen, Olivier Després, and André Dufour. What do we know about aging and spatial cognition? reviews and perspectives. *Ageing Research Reviews*, Vol. 11, No. 1, pp. 123–135, 2012.
- [15] Ahmad Abushakra and Miad Faezipour. Lung capacity estimation through acoustic signal of breath. In *2012 IEEE 12th International Conference on Bioinformatics Bioengineering (BIBE)*, pp. 386–391, 2012.
- [16] 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, pp. 1–27, 10 2020.
- [17] Quyen B. Dam, Linh T. Nguyen, Son T. Nguyen, Nam H. Vu, and Cuong Pham. e-breath: Breath detection and monitoring using frequency cepstral feature fusion. In *2019 International Conference on Multimedia Analysis and Pattern Recognition (MAPR)*, pp. 1–6, 2019.