未来潜影：風覚と振動覚の統合による高速移動感覚再現システム

司城勝樹[†1]　岩城勇太[†1]　及川桜花[†1]　門真菜巳[†1]　近藤耀[†1]　酒井優輝[†1]
廣野一也[†1]　堀彰悟[†1]　劉翔宇[†1]　宮田一乘[†1]　金井秀明[†1]

概要：本研究では，仮想空間内において物体の影を利用した高速移動システムを提案する．提案システムでは，体験者は影の範囲内を移動できる．体験者はハンドトラッキングを用いて仮想空間内の太陽の位置を操作し，物体の影の形状を動的に変化させることで，移動の経路を構築する．体験者の足元に影が到達した際に特定のポーズを取ることで，その影の上を高速移動できる．移動中にはエアブロアによる風刺激および鎖骨部への振動提示を組み合わせたハプティックフィードバックを導入し，向かい風や体の揺れを提示することで運動感覚を強化する．これにより，視覚情報と身体感覚を統合し，仮想空間内で高度な没入感とリアリティを実現した．

1. はじめに

影を利用した移動や演出は，アニメ『NARUTO』や，ゲーム『メトロイド』シリーズをはじめとする多くのメディア作品で広く用いられており，その直感的な操作性と没入感の高さから，視覚的にも体験的にも魅力的な表現手法とされている．しかし，影を移動手段として利用する体験は現実では実現不可能である．この制約を仮想空間内で解決することで，新しい移動体験を提供する可能性が広がる．特に，広大な仮想空間においては，高速移動が探索効率を向上させるだけでなく，爽快感や臨場感といった没入感を強化する重要な役割を果たす．一方で，従来の高速移動手法には，抽象的な操作性や移動中の身体感覚の欠如といった課題があり，これが移動体験のリアリティを損なう要因となっていた．

本研究では，影を移動手段として利用し，仮想空間における高速移動体験を実現するシステムを提案する．提案システムでは，体験者は影の範囲内のみを移動できる設定とした．体験者は仮想空間内でハンドトラッキングを用いて太陽の位置を操作する．この操作により，仮想空間内の物体の影を動的に変化させ，その影を辿ることで体験者は影内を高速移動する．また，風力や振動といった触覚提示を組み合わせ，視覚情報と身体感覚を統合し，移動体験の没入感を向上させた．

本稿で述べるシステムは IVRC（Interverse Virtual Reality Challenge）2024 の SeedStage および LeapStage で展示を行い，評価実験を通じて得られた結果をもとに改良を加えたものである．具体的には，これまで用いていた腹部振動を除外し，風力と鎖骨振動の効果に焦点を当てることで，移動感覚の提示精度を向上させた．本稿では，改良した高速移動システムの設計とその効果について述べる．

2. 関連研究

2.1 影を用いたインタラクティブシステム

影を利用した遊びや視覚的表現は，古くから人々に親しまれており，その親しみやすさと直感性から，多くのエンターテインメント分野で活用されてきた．影絵や影をテーマにした物語，さらに影を操作するゲームデザインは，単なる視覚的な魅力にとどまらず，ユーザーの想像力を刺激し，没入感を高める効果があるとされる[1][2]．特に，影を操作することによってキャラクターの移動や隠れる要素を取り入れるゲームは，視覚的な斬新さと直感的な操作性を融合させた設計として高く評価されている[3]．

影の特性を利用したシステム設計においては，影を新しいインタラクション手段として応用する研究が進められている．たとえば，佐藤ら[4]は，影の形状を動的に変化させるインタラクティブシステムを提案し，影を用いた操作が情報提示やエンターテインメントの領域で直感的かつ効果的な手段となり得ることを示唆した．このような背景から，影を利用したインタラクションには高い需要があり，新しい体験価値を提供する可能性が広がっていると考える．

2.2 風刺激と振動刺激による自己運動知覚提示

自己運動知覚（self-motion perception）は，多感覚間の統合によって生じる現象であり，視覚情報を中心に皮膚感覚や前庭感覚が密接に関与していることが知られている．村田ら[5]は，振動による前庭刺激と皮膚感覚（風刺激）を組み合わせることで，自己運動知覚が生じることを示した．この研究では，風の強度を変化させることで，刺激強度の増加が自己運動感覚の強度を高める効果を持つことが明らかにした．また，移動方向や移動の潜時（反応時間）が風刺激の強度やその変化に大きく影響されることも確認されている．

†1 北陸先端科学技術大学院大学

© 2025 Information Processing Society of Japan.

2.3 関連研究との比較

本研究では，鎖骨部への振動提示と風刺激を組み合わせた触覚提示システムを提案し，高速移動感覚を再現した点に独自性がある．桜木ら[6]の研究では，鎖骨部が振動を効果的に伝播する部位であることを示しており，この部位への振動提示が触覚提示の質を高める重要な役割を果たすと報告している．本システムでは，風刺激が移動速度や方向感覚を提示する一方，鎖骨部への振動提示は体の揺れを表現し，さらに風刺激を補完・増強することで，移動感覚の没入感向上を試みた．

3. 体験シナリオ

本システムは，仮想空間内で太陽を操作し，影の形を変化させることで高速移動を実現する VR 作品である．高速移動中には，仮想空間内の体験者が前方に高速移動する映像と実空間での振動装置および風力装置を同期させ，風力装置が風向と風力を,振動装置が鎖骨への振動を提示する．これにより，体が正面方向に高速移動している感覚を被験者に提供する．体験シナリオのイメージは図 1 であり，手順を以下に示す.

1) 被験者は椅子に座り, 左右の鎖骨部分に振動装置を装着する. その後, ヘッドマウントディスプレイ（HMD）である Oculus Quest3 を装着する.
2) Oculus Quest3 に搭載されている標準機能であるハンドトラッキングを用いて手指の形状を取得して仮想空間内の太陽を操作し, 投影される影を体験者の足元に移動させる.
3) 影が足元と一致したときに手の特定のポーズをとることで, 仮想空間内では体験者が影の上を辿り高速移動する．実空間では，風力装置が体験者に向けて風を送るとともに, 鎖骨への振動提示が体の揺れを再現し, 高速移動感覚を演出する.

以上の 2,3 の操作を繰り返すことで体験者は進行したい方向に影の形を調整し, 影の上を高速移動する体験を継続する.

なお，体験時間は，VR 酔いを考慮し 2 分に設定した.

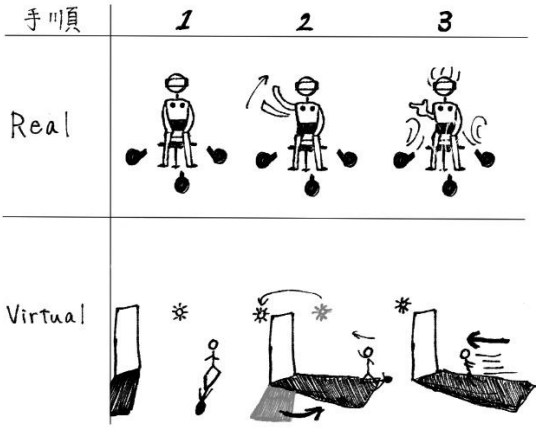

図 1.体験シナリオ

4. システム設計と実装

本研究では，高速移動感覚を提示するために，風覚提示装置，振動提示装置，および映像システムを統合し，視覚・触覚の相互作用による没入感向上を目指した．本システムの統合には，Unity と ESP32 を用いて各装置の同期を実現している．本システムの全体構成を図 2 に示す．体験者が手で特定のポーズを形成すると，Oculus Quest3 がこれを検出し高速移動の信号をコマンドとして Unity から ESP32 へ送信する．コマンドを受信した ESP32 は高速移動を表現する風覚提示装置，振動提示装置による出力を体験者に与える．それぞれの構成要素について以下に説明する．

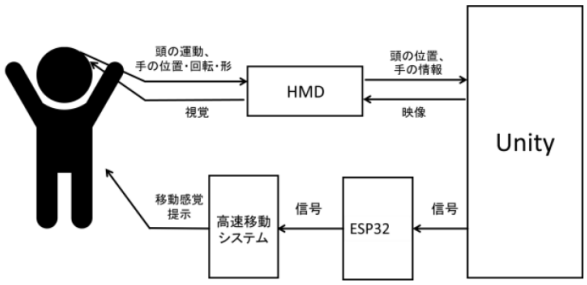

図 2.システムの全体構成

4.1 風覚提示装置

風覚提示装置は，3 台のエアブロア（SHB-370B）を用いて高速移動時の風刺激を提示する．エアブロアは床面に固定し，被験者の正面方向を基準として-60°, 0°, 60°の位置に配置する（図 3）．エアブロアの風向は被験者の顔方向に向け，移動中の向かい風を効果的に提示する．

リレースイッチと ESP32 を使用してエアブロアの ON/OFF を切り替えることで，送風方向を調整する．高速移動開始時には，被験者の正面方向に最も近いエアブロアを選択し，移動方向に応じた向かい風を提示することで，移動感覚を増強する．

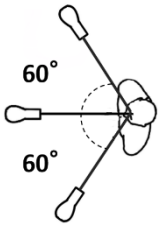

図 3. エアブロアの配置

4.2 振動提示装置

振動提示装置では，2 台小型スピーカー（Claret Audio F-LINE SZKE-115）を振動子として活用し，体の揺れ感を提示することで，移動感覚のリアリティを向上させる．振動子は被験者の左右の鎖骨部分に固定し，高速移動開始時に ESP32 を用いて制御する（図 4）．デジタルオーディオアン

© 2025 Information Processing Society of Japan.

プ（Yclover オーディオパワーアンプ）を用いてスピーカーを駆動し，振動を効果的に生成する．この設計により，安定した振動出力と高い提示精度を実現している．鎖骨部は振動が効果的に伝播する部位であり，振動提示は移動時の身体的揺れを提示するとともに，風刺激を補完・増強する役割を果たす．

この組み合わせにより，風覚提示が移動速度や方向感覚を提示する一方で，振動提示は体の揺れ感を提示し，システムは多感覚統合によるリアリティの高い移動体験を提供する．

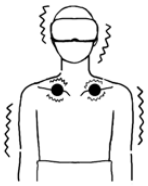

図 4.振動子の配置

4.3 映像提示装置

映像提示装置は，高速移動時の視覚的な没入感を向上させる．仮想空間内では，体験者が前方に進む様子を表現する映像と，集中線を用いた視覚効果を提示する（図 5）．これにより，視覚的情報が風覚提示および振動提示と組み合わされ，高速移動感覚の没入感を増強する．

図 5.高速移動の映像

5. プロトタイプ実験

2024 年に開催された IVRC の SeedStage 及び LeapStage でプロトタイプを展示し，体験者に自由記述のアンケート調査とインタビューを行った．各プロトタイプ実験の結果を以下に示す．

5.1 プロトタイプ実験 1

5.1.1 実験概要

2024 年 9 月 11～13 日に開催された IVRC の SeedStage で一度目のプロトタイプ実験を行い，体験者へのアンケート調査とインタビューを行った．体験中の様子の写真を図 6 に示す．

プロトタイプ 1 と提案システムとの異なる 2 点を以下に示す．

(1) 振動提示法：プロトタイプ 1 では，背部と腹部への振動によって移動感覚の提示を行った．装置は渡邊ら[7]の貫通感覚提示システムを参考に製作した．プロトタイプ 1 の振動提示装置を，体験者の背部と腹部に振動子を取り付けたベルトを装着して圧着させる．振動子を後側，前側の順で時間差を設けて作動することで，移動時の後ろから前に体を突き抜けたような感覚を提示し，前に進む移動感覚を体験者に提示した．

(2) 映像提示法：プロトタイプ 1 では高速移動時の集中線表示を行わず，周りの景色が見やすい，より現実に近い映像デザインとした．

なお映像風覚提示装置は本稿で述べたものと同様である．

図 6. IVRC SeedStage での体験中の様子

5.1.2 実験のアンケート調査と考察

評価実験への回答者は 22 名であり（男性 17 名，女性 5 名），アンケート内容はいずれも自由記述とし，7 項目について体験の質や課題点を調査した. 質問項目を表 1 に示す.

表 1　アンケートの項目

No	質問内容
1	高速移動している感覚はあったか
2	振動に進む感覚はあったか
3	映像と装置にズレはあったか
4	操作のしやすさはどうだったか
5	本体験の良かったところ
6	本体験の改善点

1） 高速移動感覚の有無：22 名全員から「高速移動感覚を感じた」という主旨の回答が得られた. 特に「風」「爽快感」という単語が多く使われ，風覚が高速移動感覚の提示に寄与すると考えられる．

2） 振動による前進感覚の有無：「感じた」と回答したのは 5 名のみで, 17 名は感じなかったと回答した.「振動は感じたが前進感覚とは関連がなかった」,「風覚提示の方が強く，意識しないと分からない」という主旨の回答が半数以上を占め，背部と腹部の振動による貫通感覚だけでは移動感覚を提示しきれなかっ

© 2025 Information Processing Society of Japan.

たことを確認した．

3） 映像と装置との動作のずれ：18 名から「ずれはなかった」という回答を得た．また「ずれがあったと回答した 4 名全員が「入力時にずれを感じる」と回答しており，感覚提示と映像システムはずれは一致しているものの，ハンドトラッキングによる太陽操作の精度を向上させる必要性が示された．

4） 操作のしやすさ：10 名から「しやすい」，12 名から「しにくい」という回答が得られ，個人差により大きくばらつきが見られることが示された．また，体験者の様子から VR の操作に慣れているかで大きな差が感じられ，未経験者でも直感的な操作ができるよう改良の必要性が示された．

5） 本体験の良かった点：13 名から「移動感覚」，5 名から「操作性」，その他「ゲームとしての完成度」「アイデアの面白さ」などの回答を得た．特に移動感覚は「爽快感」「疾走感」の単語が多く用いられ，風覚提示によって体験の質の向上したことを確認した．

6） 本体験の課題点：「体験時間の短さ」が最も多く，次に「操作性」についての課題の指摘があった．これらは，VR に慣れていない人を考慮した難易度設定にしていたため，VR 経験者は体験時間を短く感じ，慣れていない人は操作にしにくさを感じたと考察できる．初心者でも直感的に操作ができる画面作りの必要があると考えられる．

これらの課題に対応するため，システムの操作性と各装置の改善を行った．特に，プロトタイプ 2 では移動感覚を増強するために新たな振動提示装置の制作を試みた．また，高速移動感覚をさらに高めるため，映像システムにも改良を加えた．これらによって改善したプロトタイプ 2 の展示および実験について，以下に述べる．

5.2 プロトタイプ実験 2

5.2.1 実験概要

2024 年 10 月 26～27 日に開催された IVRC の LeapStage で二度目のプロトタイプ実験を行い，体験についてアンケート調査とインタビューを行った．体験中の様子の写真を図 7 に示す．提案システムおよびプロトタイプ 1 との主な違いを以下に示す．

(1) 振動提示法：プロトタイプ 2 ではプロトタイプ 1 の貫通感覚提示に加え，鎖骨へ振動を提示することにより移動感覚の増強を図った．体験者は，肩から鎖骨にかけて振動子の位置を調節できるベストを装着し，振動子を鎖骨の位置に調整する．その後，背中のベルトを引っ張ることでベストと振動子を固定させ，さらにプロトタイプ 1 の振動提示装置を装着することで，鎖骨，背部，腹部の三か所に振動子を圧着させた．村田らの研究では，振動と風を組み合わせることで移動感覚を増強させることができると示されており，人体への振動を伝えやすい鎖骨への振動と風覚を同時に提示することで，提示する移動感覚の増強を図った．

(2) 映像システム：プロトタイプ 2 では，プロトタイプ 1 の映像に高速移動時の集中線を追加した．これにより移動中の爽快感を高め，より高速感を表現した．

なお映像風覚提示装置はプロトタイプ 1 で使用した装置および本稿で述べたものと同様である．

図 7. IVRC LeepStage での体験中の様子

5.2.2 実験のアンケート調査と考察

IVRC の展示で評価実験を行い，体験者約 100 名を対象にインタビューで体験の感想を調査した．その結果，最も多い意見として「高速移動感覚を強く感じた」という主旨の回答を得た．体験者の年齢層は大人から未就学児まで幅広かったが，ほぼ全員から同様の回答を得た．また，その要素として「風覚を感じた」が最も多かった点はプロトタイプ実験 1 と同様だったものの，「鎖骨への振動を感じた」という主旨の回答を約 9 割の体験者から得ることができた．一方で，背部と腹部への振動を感じたという回答はプロトタイプ実験 1 で回答者の約 2 割，本実験で 1 割程度しか得られなかった．このことから，効果的に振動を提示するためには鎖骨への提示が有効で，背部と腹部の振動子は排除できる可能性が示唆された．また，「高速移動感覚を強く感じた」という主旨の回答の要素として，プロトタイプ実験 1 では回答者の約 8 割が風覚にのみ言及し，背部と腹部への振動については回答がされていなかったが，プロトタイプ実験 2 では風覚に加えて，体験者の約 9 割が「鎖骨への振動を感じた」という主旨の回答をしている．さらに，両方のプロトタイプを体験した参加者からは，「プロトタイプ 1 に比べてプロトタイプ 2 のほうが高速移動感覚がより強く感じられた」という意見が多く得られた．このことから，プロトタイプ 1 と比較して鎖骨への振動によって風覚が増強し，強い高速移動感覚の提示につながったと考えられる．

5.3 プロトタイプ 3

プロトタイプ 1 と 2 を踏まえ，本システムでは左右の鎖

© 2025 Information Processing Society of Japan.

骨それぞれに振動を提示する 2 台の振動装置と，正面方向から風覚を提示するエアブロアを組み合わせた装置，プロトタイプ 3 を制作し高速移動システムを提示した（図 8）．この構成により，視覚情報と触覚情報の統合を強化し，よりリアリティの高い移動体験を提供することを目指した．

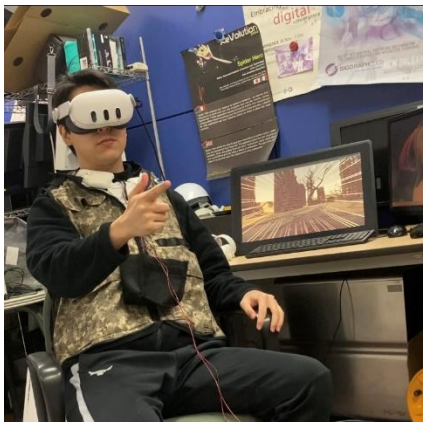

図 8. プロトタイプ 3 の体験中の様子

6. まとめ

本研究では，影の操作と多感覚提示を統合した新たな移動インタラクションシステムを実装し，直感的な操作性と没入感の高い移動体験の実現を目指した．体験者はハンドトラッキングを用いて影を操作し，その影を辿ることで高速移動を行う．また，風覚提示と鎖骨部への振動提示を組み合わせ，視覚情報と触覚情報の統合による移動感覚のリアリティを強化し，仮想空間における体験価値の向上に寄与することを示した．

IVRC でのプロトタイプ実験では，風覚提示が高速移動感覚に寄与する一方で，腹部への振動提示が効果的ではなく，移動感覚としてのリアリティが不足していることが明らかとなった．これを受けて，腹部振動提示を廃止し，風覚と鎖骨部への振動提示に焦点を絞ることで，移動中の体の揺れ感や風の効果をより明確に再現した．

今後の課題としては，触覚提示のさらなる精度向上と操作性の改善が挙げられる．また，長時間利用における快適性向上や，システムの応用範囲拡大に向けた実装が求められる．

参考文献

[1] 松下直樹 (2011). 「影絵遊びの文化的役割とその応用可能性」. 日本民俗学会, 23(4), 45-52.
[2]小川浩平 (2017). 「影を利用した視覚的インタラクションの設計」. 情報処理学会研究報告, 58(2), 128-134.
[3]田中健太郎, 松村亮太 (2014). 「影を用いたゲームデザインにおける直感的操作性の評価」. 日本デジタルゲーム学会, 8(3), 22-30.
[4]佐藤翔平, 鈴木達也 (2006). 「動的影変化を用いたインタラクティブシステムの提案」. ヒューマンインタフェース学会論文誌, 12(1), 56-63.
[5]村田佳代子, 小松英章, 石原正規, 市原茂, 増田直衛, "皮膚感覚からの自己運動知覚を前庭刺激との関係から検討（3）-刺激強度変化の影響-", 映像情報メディア学会技術報告, 2015 年
[6]桜木怜, 池野早紀子, 岡崎龍夫, 梶本裕之, "鎖骨を介した振動伝播による体内触覚提示", エンタテインメントコンピューティングシンポジウム, 2014 年
[7]渡邊淳司, 福沢恭, 梶本裕之, 安藤英由樹 ： 腹部通過 仮現運動を利用した貫通感覚提示, 情報処理学会論 文誌, vol. 49, no. 10

© 2025 Information Processing Society of Japan.