

ボディソニックを活用した サイクリング体験のリアルタイム共有

榎 優一^{1,a)} 千明 裕¹ 山崎 哲朗¹ 望月 崇由¹

概要: 本研究では、身体的な感覚受容を伴うリアルな体験をリアルタイムに遠隔にいる別のユーザに共有し、遠隔にいながらも同じ経験を共有可能とする多感覚体験伝送の検討を行っている。本発表ではサイクリングを一例に、よりリアルな体験の共有を実現するため、走行時の 360° 映像や音響に加えて、前輪・後輪から車体を介して伝わる振動を同時に伝送・提示するシステムを構築したので報告する。モノラルマイクで車体前後の振動音を収録し、既存の映像・音響伝送技術を用いて伝送し、ボディソニックデバイスを用いて振動提示を行うことで、映像・音響・振動が一体となった体験を遠隔に提供する。提案システムの構成やデモシステムの構築について述べ、実際の自転車走行によるデモンストレーションを実施する。

1. はじめに

COVID-19 の世界的な流行により、2020 年の訪日外国人観光客はコロナ禍以前の 99% 減以上に落ち込み、観光業界へ深刻な影響を与えた。各国の厳しい出入国規制や国内における県境を跨いだ往来が制限された中で、リアルな観光地への訪問を伴わず、ICT 技術を活用して実在する観光地を仮想的に訪問するバーチャルツーリズムへの注目も高まった。また、After コロナ・With コロナ時代に期待される観光のあり方として、アドベンチャーツーリズムに注目が集まっている。アドベンチャーツーリズムは、自然との触れ合い、フィジカルなアクティビティ、文化交流といった要素のうち 2 つ以上を主目的とする旅行形態とされている [14]。人間の五感を使った体験や、その土地の生活者・訪問者との交流を楽しむことを特徴とし、すでに多くの観光客がアドベンチャーツーリズムを楽しんでいる。

しかし、After コロナ・With コロナ時代の観光はコロナ禍以前の状態に戻ったわけではない。依然として入国制限・行動制限措置を課している国・地域も多く、基礎疾患を有する人の往来には注意が必要である。このような状況から、人々の求める旅行形態はリアル・バーチャルを問わず多様化しており、多様な観光スタイルが共存することが望ましいと考えられる。

バーチャルツーリズムは、その手段として zoom 等のクラウド型ビデオチャットサービスの利用が一般的であるが、VR 技術を活用した VR 観光についても数多くの報告があ

り [6][15][17][19]、国内の大手旅行代理店による修学旅行を対象とした VR 観光サービスも登場している [9]。現地の様子を 360° カメラで撮影した映像や仮想空間上に構築した旅先のコンテンツを用意し、体験者は HMD 等を用いてそのコンテンツにアクセスすることで、より没入感の高い体験が得られる。こうしたバーチャルツーリズムは、インターネット回線や HMD 等の VR 環境が用意できれば気軽に旅行経験を得ることができる。一方で、アドベンチャーツーリズムの特徴である、自然との触れ合いやフィジカルなアクティビティなどの人間の五感を駆使した体験や、現地の生活者・訪問者とのリアルな交流はその性質上乏しいという課題がある。

我々は、バーチャルツーリズムにおいてもよりリアルな体験を提供するため、身体的な感覚受容を伴う体験を遠隔の仮想体験者にリアルタイムに共有し、遠隔にいながらも同じ経験を得ることができる多感覚伝送に関する検討を行っている。その中で本研究では、アドベンチャーツーリズムの一つであるサイクリングを一例に、様々な感覚体験のうち、自転車走行時の振動触覚の体験に注目した。自転車走行時の周囲の視覚情報や現地にいる人との会話を含む音響情報の共有に加えて、前輪・後輪から車体フレームを介して伝わる振動情報を同時に収集・伝送・提示するシステムの構築を行なった。本稿では、提案システムのシステム構成や収集・伝送・提示の各方法について述べ、デモシステムの機材構成およびデモ内容について報告する。

¹ NTT 人間情報研究所

^{a)} yuichi.maki@ntt.com

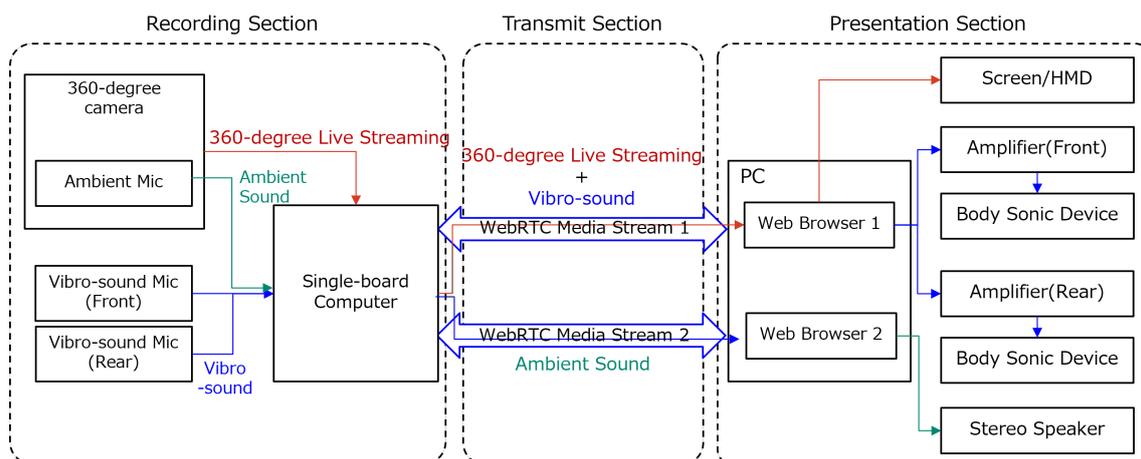


図 1 提案システムの構成図

2. 関連研究

2.1 振動触覚情報の提示

振動触覚の収集・伝送・再現に関する研究は、振動を含む多感覚の体験を仮想的に提示する Sensorama [5] を皮切りに、VR 技術の一つとして様々な研究が行われている。Minamizawa らは、振動情報を映像や音声と同種のメディアとして手軽に扱える TECHTILE toolkit を提案している [10]。振動情報は聴覚情報と発生源は同じであるとし、一連の空気振動を耳で知覚する音情報と同じように、一連の物体振動を直接触れることで知覚することから、TECHTILE toolkit における振動の収録・再生ツールをサウンドツールと同じ構成で設計している。我々もこの考え方を踏襲し、振動触覚情報を音情報として収録・伝送・再現する方針でシステム設計を行なった。

振動の提示について、Ravikrishnan らは、足裏への周期的な上下動刺激の提示を行うことで、着座姿勢でも歩行しているような体験を提示する手法を提案している [8]。また、Farkhatdinov らは、流れのあるような視覚情報を提示することで、まるで移動しているかのような錯覚が生じる視覚誘導性自己運動感覚: Vection において、着座して静止している人の足元に振動触覚を加えることでその効果が強まることを示している [2]。さらに、Sato らは、スケートボードに乗る際の路面の振動触覚を再現・提示するバーチャルスケートボードシミュレータ VibroSkate を提案している [12]。振動スピーカを内蔵したスケートボード型デバイスと、その横に置いたトレッドミル、2面没入スクリーンを用い、地面を蹴る強さに応じた仮想的な移動速度を視覚的に表現しつつ、速度および路面の種類に応じた振動を提示することで、没入感の高いスケートボード体験を提供している。このように、視覚や聴覚の情報に加えて振動触覚を提示することで、自己運動感覚が高まり、より臨場感の高い体験が得られうることが示唆されている。

2.2 振動触覚情報のリアルタイム伝送

リアルタイムな振動触覚の伝送を伴う事例も報告されている。早川らは、バスケットボールの試合観戦体験の臨場感の向上のため、床面の触覚情報を遠隔に伝送するシステムを構築している [18]。試合会場の床面に設置した8個の触覚センサで床面の振動音を収録し、約900km離れた場所に設置した2つの触覚ステージに出力している。また、Iekura らは、アスリートのスポーツ体験を遠隔地の観客に伝えるため、選手の鼓動やボールを打った衝撃、ステップを踏んだ時の触覚等の触覚体験を、Minamizawa らの TECHTILE Toolkit を用いて収集・伝送・提示をおこなう無線デバイスを提案している [7]。類似する事例として、駒崎らはハイタッチに着目し、身体接触を伴わなくともスポーツ観戦等で人と人が喜びや応援を共有する遠隔ハイタッチの手段を提案している。映像および音声の伝送によって提示される相手の映像の手前に透明ボードを設置し、そのボードに対してハイタッチを行なった際の振動を遠隔に伝送するシステムについて報告している [16]。このように、振動触覚のリアルタイム遠隔伝送により、離れたところで起きている体験をよりリアルに再現し、高い臨場感の体験創造や喜びの共有につながることを示されている。

3. 提案システム

提案システムの全体構成図を図 1 に示す。本システムは、現地で自転車の実走行を行う際の視覚・聴覚・振動触覚の情報を収録する収録部と、それら多感覚情報を遠隔の仮想体験者にリアルタイムに伝送する伝送部と、伝送される多感覚情報を受信し、視覚情報・聴覚情報・振動触覚情報をそれぞれ仮想体験者に提示する提示部の3つのパートで構成される。以後、本節では各パート毎の処理内容について述べる。

a. 収録部

収録部では、現地の実走行者が感じている視覚・聴覚・振動触覚の情報を収録する。視覚情報として、自

転車ハンドル部に取り付けた 360° カメラからのライブ映像を、聴覚情報として、カメラデバイスに搭載されたマイクもしくは無指向性のステレオマイクからの環境音情報をそれぞれ取得する。また、振動触覚情報として、路面とタイヤが接地する付近に取り付けたモノラルコンデンサマイクからの振動音情報を取得する。前輪・後輪それぞれ1つずつ用い、2chのオーディオ入力をステレオ入力として取得する。これにより、前輪からの振動と後輪からの振動を個別に扱いつつ、データとしては1つのステレオオーディオとして扱うことができる。振動情報を音情報として扱うことで、後述する伝送部において既存のリアルタイム音声伝送手段を用いて容易に伝送することができる。

b. 伝送部

収録部で取得した 360° カメラのライブ映像・環境音情報・振動音情報は、伝送部で圧縮し提示部へ伝送される。本システムでは、実走行者の感覚体験がリアルタイムに仮想体験者に共有される必要があることから、低遅延で各情報が伝送されることが求められる。そこで、各情報の伝送には、サブセカンドオーダーメディア情報を伝送可能な WebRTC[13] の技術群を用いることとする。ライブ映像、環境音情報、振動音情報をそれぞれ WebRTC がサポートしているビデオコーデックやオーディオコーデックでエンコードし、WebRTC の API を用いて遠隔に伝送する。ライブ映像は、WebRTC のメディアストリームの映像トラックを介してリアルタイムに遠隔に伝送する。同様に、環境音や振動音は WebRTC のメディアストリームの音声トラックを介してリアルタイムに伝送する。しかし、WebRTC の音声トラックで伝送可能な音声のチャンネル数は現状最大で 2ch(ステレオ) までしか対応していない。そのため、環境音は別のメディアストリームを用いて伝送し、振動音はライブ映像と同じメディアストリームで伝送することとした。これは、一方のメディアストリームに遅延が発生した場合でも、映像と振動音の間の伝送遅延差は発生しにくいようにするためである。上記のような伝送方式を採用することで、実走行者の視覚・聴覚・触覚の体験を、遠隔の仮想体験者もライブで体験することができる。

c. 提示部

収録部から伝送部を介して伝送される感覚情報は、提示部でそれぞれデコードされ仮想体験者に提示される。その際、実走行者の体験となるべく同じ体験が得られるよう、屋内用のサイクルレーナーを用い、実走行者と同じ姿勢で体験してもらうようにする。映像の提示は、仮想体験者が装着した HMD、または仮想体験者の前面に設置したスクリーンや CAVE などの没入型スクリーンに提示する。WebRTC を用いて伝

送される 360° カメラのライブ映像は、ブラウザ上で動作する web アプリケーションでデコードし表示する。その際、360° カメラ映像の記録方式に合わせた変換を行い、全天球映像から前方スクリーンや側面スクリーンに出力する映像を切り出して表示する。

また、収録部で前輪・後輪独立で取得した振動音は、ステレオ 2ch の音声ストリームとして伝送される。提示部ではこの 2ch のステレオ音声を左右それぞれ別のアンプに出力する。本システムでは、振動触覚の提示にボディソニックデバイスを用い、伝送される振動音の低周波成分を振動として利用者に提示する。ボディソニックは、エンターテインメントやリラクゼーション医療の分野で、音楽を身体振動で感じるオーディオ技術として広く活用されている。

また、伝送された環境音は、市販のステレオスピーカー等で遠隔の体験者に提示する。

このような構成を取ることで、360° 映像、環境音、振動を遅延なく遠隔の体験者に提示することが可能となる。

4. システム構築およびデモンストレーション

3 節で述べたシステム構成に基づいて、本デモ発表に向けたデモシステムを構築した。実走行する自転車に搭載する小型シングルボードコンピュータは NVIDIA® 社の Jetson Nano™ を用いる。Jetson Nano™ に接続する 360° カメラは RICOH 社の Theta Z1 を用い、4K 画質の Equirectangular 形式の 360° ライブストリーミング映像を取得する。また、環境音の収録は Theta Z1 搭載のマイクで取得した Linear PCM(4ch) のうち 2ch を用いる。

振動音の収録は、単一指向性のモノラルマイク 2 本を用いて行なう。マイクはそれぞれ前輪・後輪のハブやフレームからクランプ等を用いて路面付近に延伸し、路面とタイヤが接地する付近の音を収録するように設置する。それぞれのマイクをモノラルミニ 2ch-ステレオミニ変換アダプタおよびステレオミニ-USB 変換アダプタを介して Jetson Nano™ に接続する。

360° 映像・環境音・振動音の伝送は、3 節で述べた通り WebRTC を用いる。小型シングルボードコンピュータ上のブラウザレスな環境で WebRTC を用いるため、Linux 上で動作する WebRTC ネイティブクライアントを用いる。今回は時雨堂社が開発し Apache License 2.0 のオープンソースソフトウェアとして公開している WebRTC Native Client Momo を用いた。

また、Momo からの振動音収録用のマイクおよび Theta Z1 搭載のマイクへのアクセスは、Linux のサウンドサーバ実装である PulseAudio を介して行われる。360° カメラ映像と振動音はそれぞれ別のデバイスから独立に取得しているため、それぞれには定常的な時間差が発生している。そのため、両者の時間差を実験的に求め、PulseAudio の



図 2 デモンストレーションの様子

機能を用いて振動音の入力に一定の遅延を加え、両者の取得タイミングを揃えるようにしている。

提示部では、環境音のメディアストリームおよび 360° 映像・振動音のメディアストリームは、それぞれ別のブラウザで受信する。環境音はそのままステレオスピーカーを用いて再生する。360° カメラ映像は、オープンソースの WebVR フレームワークである A-Frame [1] を用いて、360° 映像から前面および左右 3 画面の映像を出力する。今回はブラウザ上での各映像表示を NDI Scan Capture [11] でキャプチャし、そのキャプチャ映像をプロジェクションマッピングソフトの Madmapper [3] を用いて前面および左右の没入型スクリーンに出力している。振動音は、ステレオミニ-RCA 変換ケーブルで LR に分離し、それぞれを独立にボディソニックデバイスのオーディオアンプに接続する。今回は、ボディソニックデバイスとして ButtKicker [4] 社の ButtKicker Gamer 2 for Japan を用いた。デバイスにクランプが付いているため、提示部の屋内用トレーナの任意の位置に固定できる。実走行する自転車の前輪マイクで取得した振動音は屋内用トレーナのハンドル部に取り付けられたボディソニックデバイスへ、後輪マイクで取得した振動音はサドルポール部に取り付けられたボディソニックデバイスへそれぞれ出力する。

このような構成でデモシステムを構築し、その動作検証を行なった。デモの様子を図 2 に示す。現地で実走行を行うと、遠隔の屋内トレーナに乗る体験者には、周囲の映像と同期する形で自転車走行時の振動が提示された。視覚情報・聴覚情報・振動触覚情報といった現地での実走行の体験を、遠隔の体験者に提示できていることが確認できた。

5. おわりに

本発表では、アドベンチャーゲームの一つであるサイクリングを例に、自転車走行時の視覚・聴覚・振動触覚体験をリアルタイムに遠隔の仮想体験者に共有し、遠隔にしながらもリアルなサイクリング体験が可能なシステムの検討について報告した。現地での実走行で発生している振動触覚情報を振動音として収録し、リアルタイムメディア伝送技術である WebRTC を用いて映像と共に伝送し、さらにボディソニックを用いてその低周波成分のみを振動と

して提示することで、リアルタイムにサイクリング走行体験を共有し、バーチャルリズムでありながらも実際に現地で走行しているかのような体験を提供できる可能性を示した。

今後の課題としては、以下が挙げられる。まず、今回構築したシステムを用いての走行体験の主観評価を実施する必要がある。また、今回収録した振動音はノイズキャンセリング処理等を行っていないため、現地での実走行中に付近を大型自動車等が通り過ぎた際に、本来は感じていない振動が仮想体験者に提示されてしまうという問題がある。音による振動触覚情報だけでなく、自転車車体の動き情報なども用いたノイズ除去手法について検討する必要がある。また、本発表で示したシステム構成では、遠隔の仮想体験者側のハンドルやペダル操作の情報は一歳考慮されていない。将来的には現地で実走行を行う体験者と遠隔で仮想走行を行う体験者が、お互いに空間内を自由に走行したり並走したりしながらサイクリングを楽しめるようになるのが理想であると考えている。その際、現地で走行している自転車の振動音を直接収集するだけでなく、仮想体験者が任意の位置を走行している場合の振動を推定・生成して提示するなど、新たなアプローチが必要になると考えている。これらの改善を繰り返していき、これまでにない新しいリアル・バーチャル融合のサイクリング体験を創出していくことを目指す。

謝辞 本研究を進めるにあたり、NTT コミュニケーション科学基礎研究所の渡邊淳司氏、NTT 社会情報研究所の駒崎掲氏には、基礎検証およびシステム検討において多くのアドバイスとご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A-Frame: A-Frame - Make WebVR, A-Frame (online), available from <https://aframe.io/> (accessed 2023-7-28).
- [2] Farkhatdinov, I., Ouarti, N. and Hayward, V.: Vibractile inputs to the feet can modulate vection, *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pp. 677-681 (2013).
- [3] garageCube: MadMapper Home, garageCube (online), available from <https://madmapper.com/> (accessed 2023-7-28).
- [4] Haptics, B.: ButtKicker - The Leader in Haptics, ButtKicker Haptics (online), available from <https://thebuttkicker.com/> (accessed 2023-7-28).
- [5] Heilig, M. L.: Sensorama Simulator, *U.S. PAT. 3,050,870*, (online), available from <https://patents.google.com/patent/US3050870A/en> (1962).
- [6] Hobson, J. P. and Williams, A.: Virtual reality: A new horizon for the tourism industry., *Journal of vacation marketing*, Vol. 1, No. 2, pp. 124-135 (1995).
- [7] Iekura, M.-S., Hayakawa, H., Onoda, K., Kamiyama, Y., Minamizawa, K. and Inami, M.: SMASH: syn-

chronization media of athletes and spectator through haptic, *SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications*, No. 20, pp. 1–2 (2015).

- [8] Jayakumar, R. P., Mishra, S. K., Dannenhoffer, J. F. and Okamura, A. M.: Haptic footstep display., *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 425–430 (2012).
- [9] JTB Corp.: リアル×VR 新感覚体験プログラム「バーチャル修学旅行360」, JTB Corp. (オンライン), 入手先 (<https://www.jtbbwt.com/education/service/solution/jh/online/exchange-experience/virtual-trip/>) (参照 2023-07-28).
- [10] Minamizawa, K., Kakehi, Y., Nakatani, M., Mihara, S. and Tachi, S.: TECHTILE toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media., *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*, No. 26, pp. 1–2 (2012).
- [11] NDI: NDI Screen capture, NDI (online), available from (<https://ndi.video/tools/ndi-screen-capture/>) (accessed 2023-7-28).
- [12] Sato, D., Ezoe, M., Hino, A., Shimizu, A., Mitake, H. and Hasegawa, S.: VibroSkate: A Locomotion Interface with the Exact Haptics and Kinesthesia., *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, pp. 25:1–25:1 (2015).
- [13] W3C: WebRTC: Real-Time Communication in Browsers, W3C (online), available from (<https://www.w3.org/TR/webrtc/>) (accessed 2023-7-28).
- [14] 一般社団法人日本アドベンチャーツーリズム協議会: アドベンチャーツーリズムとは, 一般社団法人日本アドベンチャーツーリズム協議会 (オンライン), 入手先 (<https://atjapan.org/adventure-tourism>) (参照 2023-07-28).
- [15] 角田哲也, 大石岳史, 小野晋太郎, 池内克史: バーチャル飛鳥京: 複合現実感による遺跡の復元と観光案内システムへの展開., *生産研究*, Vol. 59, No. 3, pp. 172–175 (2007).
- [16] 駒崎 掲, 渡邊淳司: 触覚伝送による“リモートハイタッチ”: アスリートの家族間コミュニケーションや聴覚障がい者との観戦検討., *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 27, No. 1, pp. 2–5 (2022).
- [17] 松元崇裕, 駒崎 掲, 榎 優一, 千明 裕, 望月崇由: TENGUN Ogijima: 計測データに基づく視覚・聴覚・触覚を通じた高臨場 VR に関する研究., *インタラクション 2023 論文集*, pp. 530–535 (2023).
- [18] 早川裕彦, 神山洋一, 松園敏志, 徐萌芸, 田中培仁, 本山拓人, 鈴木規之, 南澤孝太: 触覚伝送を伴うバスケットボールのライブフィードバックの実践., Vol. 23, No. 34E–6 (2018).
- [19] 鳴海拓志: デジタルミュージアムにおける VR/AR の利用., *人工知能*, Vol. 31, No. 6, pp. 794–799 (2016).