



地面に設置したターンテーブルによる打撃感の提示

Presentation of impact sensations by a floor-mounted turntable

島田睦生¹⁾, 溝口泉¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Mutsuki SHIMADA, Izumi MIZOGUCHI, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報学専攻 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {shimada, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: これまでの打撃感提示の研究では装着型や把持型デバイスを用いて手に衝撃を提示してきた。しかし、打撃時の反力は、手に加わるのみならず、身体を經由し最終的には足と地面の間にも生じる。この物理的性質を利用すれば、足への反力提示により打撃感が増強されると考えられる。本報告では設置型デバイスとしてターンテーブルを用い、ユーザがその上に立ち、打撃動作の瞬間にターンテーブルを瞬間的に回転させることで足元の反力を提示し、打撃の臨場感を向上させる手法を検証する。

キーワード: 触覚, 力覚, 反力, 打撃感

1. はじめに

近年, VR の没入体験においては視覚や聴覚だけでなく, 触覚にもリアルな再現が求められている。特に, 格闘スポーツや道具操作を含むインタラクションにおいては, 「打撃感」と呼ばれる衝突時の触覚フィードバックの提示が重要である。

打撃感に含まれる触覚の要素を分解すると, 振動 (高周波成分) と反力 (直流を含む低周波成分) に分解できる。従来, これらをいかに効率的に提示するか数多くの研究が行われてきた。まず卓上型のハプティックデバイスを用いる場合には, ハプティックデバイスのみによって振動から反力まで幅広く提示する方法や[1][2], ハプティックデバイスに振動子を搭載することで二つの要素を組み合わせる方法[3]が多く用いられてきた。ただし卓上型装置は可動範囲の問題があり, 例えば卓球にも野球にも使えるような打撃感提示装置を作ることは難しい。

可動範囲の問題を解決する一つの方法は, ウェアラブルないしポータブル型の触覚提示手法で振動または反力を提示するというものである。例えばハンドヘルドデバイスを振動させる方法[4], 皮膚の横ずれを提示することで振動感と疑似的な反力を提示する方法[5][6]等が提案されている。反力を提示する手法として, ゴムによる弾性フィードバックを用いる方法[7][8], ハンドヘルドデバイスの内部で物体を衝突させて衝撃を提示する方法[9][10][11], プロペラによる推進力を用いる方法[12][13][14], ジャイロ効果を用いる方法[15], 電気筋刺激で腕を引き戻す方法[16]などが提案されている。また, ハプティックデバイス

の物理的変化によって抵抗感を出すものとして, 扇子の開く度合いによって空気抵抗を変化させる方法[17], 錘の移動によって慣性モーメントを変化させる方法[18][19][20][21]が提案されている。

以上のように打撃感是非常に幅広く提案されているが, 振動提示デバイスは振動成分を高忠実に再現できる一方で反力を十分に再現できない。また反力提示デバイスは, ポータブルないしウェアラブルという制約上, 身体外部から働く力 (ここでは外力と呼ぶ) の表現が十分ではない。結果として打撃感に含まれる定常的かつ一方向の力の感覚を提示することは困難という課題があった。

我々は打撃時の反力の行き先について考察し, 「打撃時の力の最終的な作用先は地面である」点に着目した。テニスを例にとると, 人がボールを打つ際, その反力はラケットを通じて手から身体へ, そして地面へと伝わる。したがって, この「地面と身体との作用」を再現することで, より自然で説得力のある打撃感の再現につながる可能性がある。

本研究では, 「打撃の瞬間に足元に伝わる力」に着目し, 身体と地面との間に生じる作用反作用力を疑似的に提示する手法として, 足元のターンテーブルを用いて回転刺激を提示することを提案する (図 1)。これにより, 足元から身体全体へ反力を感じられるため, 従来よりも強い衝撃感を提示できる。またこの手法は手への反力提示を必要としないため, 卓上型のハプティックデバイスと比べると手の可動範囲の問題は少ない。



図 1: ターンテーブル型デバイス

従来研究でも、打撃感を提示するために、ハンドヘルドデバイスに内蔵されたモータの回転速度を急変させ、角加速度を感じさせることで打撃感を提示することが試されてきた [22]。本研究で用いる手法はこれを、足元に提示する手法であるともとらえられる。

我々は、人が右手を前方に振って打撃した場合に打撃感を最も得る回転は「反時計回りの角加速度を与えている瞬間」だと推測する。ボールが右手と衝突するとき、ボールからは体を時計回りに回転させる向きの外力が発生する。この外力は足と地面の接触部においては、地面を時計回りに回転させる外力となる。逆に地面からは、足を反時計回りに回転させる向きの外力が発生することで、身体は釣り合いが保たれる (図 2)。

つまり打撃感をターンテーブルで表現するためには、足を反時計回りに回転させる向きの加速度を与える必要がある。ただし、この試行を繰り返すとターンテーブルは無限に回転してしまうので、ターンテーブルを時計回りに回転させて姿勢を元に戻す必要がある。多くの知覚現象において人は最初の強い刺激を明瞭に感じ、その後の刺激がマスクされるので、「ターンテーブルを反時計回りに回転させ、その後時計回りに回転させる」という手法を取れば、最初の瞬間の反時計回りの加速度を明瞭に知覚させられると考えられる。



図 2: 体に加わる力の方向

2. デバイス構成

本手法の有効性を検討するため、ターンテーブルの回転を制御するデバイスを作成した (図 1)。デバイスは RC サーボモータ (DS51150, DIYmall)、タイミングベルト、直径 60cm のターンテーブルで構成される。サーボモータの回転がタイミングベルトを介してターンテーブルに伝達される仕組みである。

RC サーボモータの制御はマイコン (Raspberry Pi Pico W) にて PWM 波形による位置制御で行っており、マイコンは PC と接続されシリアル通信によってデータを受信可能な状態となっている。マイコンは PC からのデータを受信すると、指定された角度に回転する。サーボモータを一方方向に回転させ、その後逆回転させることで打撃感を提示する。

3. 実験 1. 打撃感を得られる最適なターンテーブルの回転方向の検証実験

本実験の目的は、打撃感を得られる最適なターンテーブルの回転方向を検証することである。

3.1 VR 環境

被験者はターンテーブルに乗り、Meta Quest3 を頭に装着し、右手に Meta Quest3 コントローラを把持した。被験者の視点には、右手にラケットを持ち、ボールが自身に向かって発射される VR シーンが提示された。

3.2 実験条件

被験者は 21 歳から 24 歳までの 7 名 (男性 4 名、女性 3 名) で行った。被験者は右利き 6 名、左利き 1 名であった。

実験条件はターンテーブルの回転方向の 1 要因からなる。回転方向は、無回転 (None 条件)、時計回り直後に反時計回り (CW/CCW 条件)、反時計回り直後に時計回り (CCW/CW 条件) の 3 条件とした。

被験者が打撃動作を行うと、最初の瞬間にターンテーブルが回転するという指令を出し、0.1 秒間その指令を維持する。その後逆向きに回転するという指令を出し、初期位置に戻るまでその指令を維持する。回転パラメータは筆者によって十分に反力が感じられる程度に定められ、全ての被験者間で同じパラメータで実験が行われた。

回転角度の計測を動画撮影によって行った。計測は搭乗者無し、有りそれぞれの条件で 5 回ずつ、被験者 1 名 (体重 48kg) に対して行った。図 3 に回転指令を時刻 0 としたときの実際の回転角度の変化を示す。ターンテーブルへの人の搭乗の有無で回転量が約 1° 変動し、人が乗った場合の最大角度は約 4° となった。指令から回転が始まるまでの遅延は 0.1 秒未満に抑えられた。

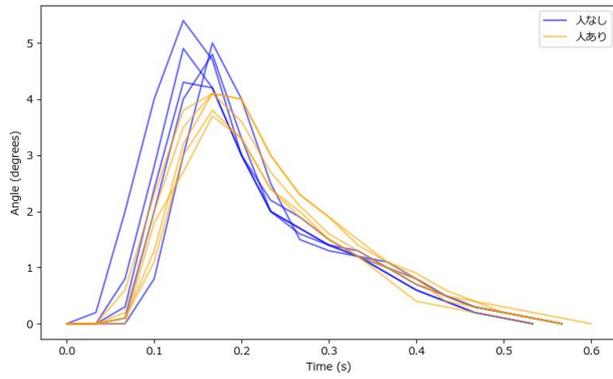


図 3: ターンテーブルの回転角度の計測データ

3.3 実験アンケート

本実験ではアンケートを用いて被験者の主観的な体験を評価した。評価は 7 段階のリッカート尺度で行った。評価項目は打撃感, 臨場感, 行為主体感, ユーザ体験の楽しさの計 4 つである。

3.4 実験手順

はじめに, 被験者はターンテーブルに乗り, Meta Quest3 を頭に装着し, 右手に Meta Quest3 コントローラを把持した。次に, VR 環境内で自身に向かって発射されるボールに対して打撃練習した。その後, それぞれの条件で, 8 球程度打撃し, 十分打撃感を体験したと感じたのちに実験アンケートに回答した。以上の手順を 3 条件ごとに繰り返した。実験条件は被験者ごとに疑似ランダム順で 1 回ずつ行われた。

3.5 実験結果

実験結果を図 4 に示す。赤の線は中央値, バツ印は平均値を示す。このデータに ART-ANOVA 検定およびボンフェローニ補正を用いた多重比較を適用した。その結果, 打撃感では None 条件と CCW/CW 条件間 ($p=0.0060$), 臨場感では None 条件と CCW/CW 条件間 ($p=0.0029$), ユーザ体験の楽しさでは None 条件と CW/CCW 条件間 ($p=0.0090$), None 条件と CCW/CW 条件間 ($p=0.0055$) に有意差が見られた。他の組み合わせに有意差は見られなかった。

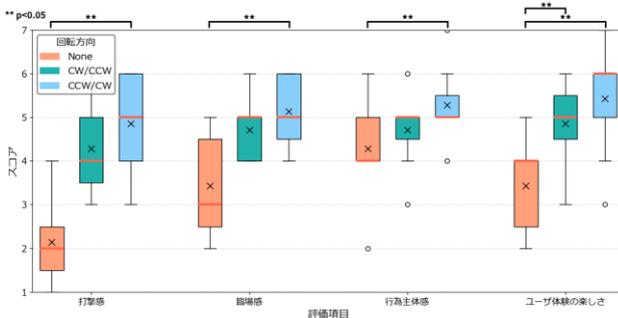


図 4: 実験 1 の結果

4. 実験 2. 手元振動とターンテーブル回転による打撃感への影響の検証実験

本研究の目的は, 従来から広く使われている手元コン

トローラの振動とターンテーブル回転を組み合わせた場合の打撃感への影響を検証することである。

4.1 実験環境

実験 1 と同様である。

4.2 実験条件

被験者は 21 歳から 24 歳までの 7 名 (男性 4 名, 女性 3 名) で行った。被験者は右利き 6 名, 左利き 1 名であった。

実験条件はコントローラの振動の有無, およびターンテーブルの回転の有無の 2 要因からなる。無提示 (None 条件), 振動のみ (Vib 条件), 回転のみ (Turntable 条件), 振動と回転の複合 (Vib+Turntable 条件) の 4 条件とした。

被験者が打撃動作を行うと, コントローラが振動を開始すると同時にターンテーブルが回転を開始する。コントローラの振動は 0.5 秒間持続する。ターンテーブルの回転方向は, 実験 1 で最も打撃感が得られた「反時計回りから時計回り」とする。回転パラメータは実験 1 と同様である。

4.3 実験アンケート

実験 1 と同様である。

4.4 実験手順

実験 1 と同様である。

4.5 実験結果

実験結果を図 5 に示す。赤の線は中央値, バツ印は平均値を示す。このデータに ART-ANOVA 検定およびボンフェローニ補正を用いた多重比較を適用した。その結果, 打撃感では None 条件と Vib 条件間 ($p=0.0094$), None 条件と Turntable 条件間 ($p=0.0039$), None 条件と Vib+Turntable 条件間 ($p=0.0010$), Vib 条件と Vib+Turntable 条件間 ($p=0.0392$), 臨場感では None 条件と Turntable 条件間 ($p=0.0186$), None 条件と Vib+Turntable 条件間 ($p=0.0105$), Vib 条件と Vib+Turntable 条件間 ($p=0.0319$), 行為主体感では None 条件と Turntable 条件間 ($p=0.0494$), Vib 条件と Turntable 条件間 ($p=0.0494$), Vib 条件と Vib+Turntable 条件間 ($p=0.0026$), ユーザ体験の楽しさでは None 条件と Vib 条件間 ($p=0.0494$), None 条件と Turntable 条件間 ($p=0.0038$), None 条件と Vib+Turntable 条件間 ($p=0.0058$) に有意差が見られた。他の組み合わせに有意差は見られなかった。

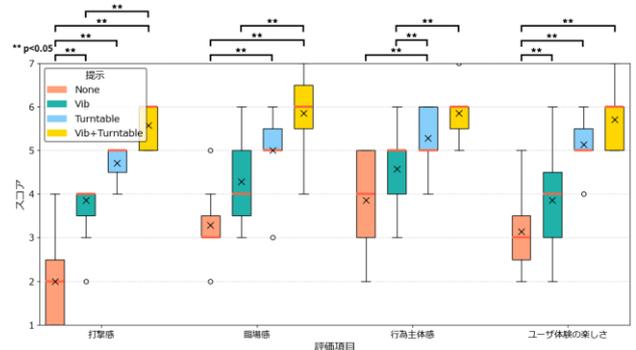


図 5: 実験 2 の結果

5. 考察

5.1 実験 1. ターンテーブルの回転方向

我々は最初に反時計回りを提示することで打撃感を感じるという仮説を立てた。結果として None 条件と比較したときに有意差が見つかったのが CCW/CW 条件だった。この条件は None 条件よりも打撃感、臨場感、行為主体感及びユーザ体験の楽しさが向上することが示唆された。したがって我々の仮説は裏付けられたと言える。一方でユーザがどのタイミングの加速度変化を主に知覚しているかは判明していない。回転開始時、回転方向切り替え時、の 2 回大きな加速度変化が生じると考えられ、どのタイミングが有効であるかについて今後検討する必要がある。

5.2 実験 2. 手元振動と足元回転の組み合わせ

実験結果より、Turntable 条件は None 条件よりもすべての評価項目においてスコアが向上すること、Vib+Turntable 条件は Vib 条件よりも打撃感と臨場感が向上することが示唆された。このことから、足元回転単独で打撃感が向上し、手元振動と組み合わせることでさらに強まったと考えられる。

また、Turntable 条件は Vib 条件よりも行為主体感が有意に高いことが示唆された。しかしながら、足元回転刺激は手元振動刺激よりも一般的に優れていることが示されたわけではない。被験者から、手元振動が軽いのに対しボールが強く飛ぶため違和感があるというコメントが寄せられており、手元振動の強度が不足している可能性が考えられる。

6. おわりに

本研究では、打撃感を提示するため、足元のターンテーブルを用いて回転刺激を提示することで足元から身体全体へ反力を感じさせる新たな手法を提案した。実験 1 では、ターンテーブルの回転方向が最初に反時計回りで後に時計回りに切り替わる手法で最も強く打撃感を感じることが示唆された。実験 2 では、従来のハンドヘルドデバイスによる手元振動とターンテーブルによる足元回転を組み合わせることでさらに打撃感が強まることが示唆された。

今後は本研究で得られた知見を基にターンテーブルの回転速度と回転パターンの変化による打撃感への影響の検証を進めていく。

参考文献

- [1] P. Wellman and R. D. Howe, "Towards realistic vibrotactile display in virtual environments," in Proceedings of the ASME dynamic systems and control division, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, pp. 713-718, 1995.
- [2] 赤羽 克仁 et al. "10kHz の更新周波数による高解像度ハプティックレンダリング(<特集>五感情報インタフェース)," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 3, p. 217-226, 2004.
- [3] A. M. Okamura et al. "Reality-based models for vibration feedback in virtual environments," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp. 245-252, 2001.
- [4] F. Teck et al. "Ungrounded haptic rendering device for torque simulation in virtual tennis," In ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, pp. 1-1, 2012.
- [5] D. Inoue et al. "HapReel: A Racket-shaped Haptic Display Controller for Presenting Vibrotactile and Force Feedback through Fingertip Deformation," In SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies, pp. 1-2, 2023.
- [6] D. Kim et al. "MMGrip: A Handheld Multimodal Haptic Device Combining Vibration, Impact, and Shear for Realistic Expression of Contact," In SIGGRAPH Asia Posters, pp. 1-2, 2022.
- [7] H. Tsai et al. "ElasticVR: Providing Multilevel Continuously-Changing Resistive Force and Instant Impact Using Elasticity for VR," In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-10, 2019.
- [8] T. Wei et al. "ElastiLinks: Force Feedback between VR Controllers with Dynamic Points of Application of Force," In Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 1023-1034, 2020.
- [9] C. Park et al. "Realistic Haptic Rendering of Collision Effects Using Multimodal Vibrotactile and Impact Feedback," 2019 IEEE World Haptics Conference, pp. 449-454, 2019.
- [10] H. Chen et al. "TransPAF: Rendering Omnidirectional Impact Feedback with Dynamic Point of Application of Force All Round a Controller," In Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-13, 2023.
- [11] C. Fan et al. "SpinShot: Optimizing Both Physical and Perceived Force Feedback of Flywheel-Based, Directional Impact Handheld Devices," In Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 1-15, 2024.
- [12] S. Je et al., "Wind-blaster: a wearable propeller-based prototype that provides ungrounded force-feedback," In ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, pp. 1-2, 2018.
- [13] S. Heo et al. "Thor's Hammer: An Ungrounded Force Feedback Device Utilizing Propeller-Induced Propulsive Force," In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-11, 2018.
- [14] T. Sasaki et al. "Leviopole: mid-air haptic interactions using multirotor," In ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, pp. 1-2, 2018.
- [15] T. Hashimoto et al. "MetamorphX: An Ungrounded 3-DoF Moment Display that Changes its Physical Properties through Rotational Impedance Control," In Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 1-14, 2022.
- [16] P. Lopes et al. "Impacto: Simulating Physical Impact by Combining Tactile Stimulation with Electrical Muscle Stimulation," In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 11-19, 2019.
- [17] P. Lopes et al. "Impacto: Simulating Physical Impact by Combining Tactile Stimulation with Electrical Muscle Stimulation," In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 11-19, 2015.
- [18] S. Sagheb et al. "SWISH: A Shifting-Weight Interface of Simulated Hydrodynamics for Haptic Perception of Virtual Fluid Vessels," In Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 751-761, 2019.
- [19] S. Shimizu et al. "Unident: Providing Impact Sensations on Handheld Objects via High-Speed Change of the Rotational Inertia," In 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 11-20, 2021.
- [20] C. Swindells et al. "TorqueBAR: an ungrounded haptic feedback device," In Proceedings of the 5th International Conference on Multimodal Interfaces, pp. 52-59, 2003.
- [21] J. Shigeyama et al. "Transcalibur: A Weight Shifting Virtual Reality Controller for 2D Shape Rendering based on Computational Perception Model," In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-11, 2019.
- [22] 仲田 謙太郎 et al. "角運動量変化を利用した力覚提示デバイス," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No. 2, pp. 115-120, 2001.