

# ハンドヘルド型多方向衝撃提示デバイスを用いたVR剣戟体験

上野 一颯<sup>\*1</sup> 原 和希<sup>\*1</sup> 加藤 蒼惟<sup>\*1</sup> 袁 朝陽<sup>\*1</sup>  
前川 勇也<sup>\*1</sup> 中村 文彦<sup>\*1</sup> 木村 朝子<sup>\*1</sup> 柴田 史久<sup>\*1</sup>

VR Sword-Fighting Experience Using a Handheld Multi-Directional Impact Feedback Device

Issa Ueno<sup>\*1</sup>, Kazuki Hara<sup>\*1</sup>, Aoi Kato<sup>\*1</sup>, Zhaoyang Yuan<sup>\*1</sup>,  
Yuya Maekawa<sup>\*1</sup>, Fumihiko Nakamura<sup>\*1</sup>, Asako Kimura<sup>\*1</sup>, and Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>

**Abstract** – VR空間において、剣の振り方向に基づく多方向衝撃の提示は、剣戟やスポーツなど方向性を伴うインタラクションの没入感向上に重要である。本展示では、複数の衝撃力提示機構を組み合わせることで、剣の振り方向に基づく多方向衝撃を提示可能なハンドヘルド型デバイスを用いたVR剣戟システムのデモを行う。本システムでは4つの衝撃力提示機構を組み合わせることで複数方向からの衝撃表現を実現している。参加者は仮想アバターとの剣戟を通じて、剣の振り方向に基づく多方向衝撃を体験できる。

**Keywords** : Virtual Reality, 力覚フィードバック, 衝撃力, ハンドヘルドデバイス, フライホイール

## 1. はじめに

VR (Virtual Reality) において、バーチャル物体との力覚を通じた相互作用は臨場感を向上させる。剣やラケットなどの道具を介してバーチャル物体と接触するインタラクションでは、接触時に衝撃を提示することで、接触に伴う力を体験者へ伝えることができる。このような衝撃提示を体験者の動作範囲を大きく制限することなく実現するため、外部への固定を必要としないハンドヘルド型デバイスが提案されている。

ハンドヘルド型デバイスによる衝撃提示手法の一つに、フライホイールの角運動量を利用する方式がある<sup>[1]</sup>。Fanらが提案したSpinShotは、回転中のフライホイールを瞬間的に停止させ、角運動量の変化を利用して方向性を有する衝撃を生成する<sup>[2]</sup>。一方、SpinShotの提示方向は単一軸上の双方向に限られる。また、フライホイールの回転中にデバイスの姿勢を変化させると、ジャイロ効果が操作に影響を及ぼす可能性がある。

これらの課題に対し、フライホイールの姿勢を変更する方式や、複数のフライホイールを組み合わせる方式が提案されている。Berna MoyaらのHapticWhirlは、2軸ジンバルによってフライホイールの姿勢を制御し、複数種類の力覚を提示するとともに、通常操作時に生じるジャイロ効果の低減を図っている<sup>[3]</sup>。また、Walkerらは、2基のフライホイールを組み合わせ、単一軸まわりの回転方向の衝撃を提示する方式を提案した<sup>[4]</sup>。しかし、前者はフライホイールの姿勢を変更す

るための機構を必要とし、後者は単一軸への衝撃提示を対象としている。したがって、回転軸を切り替える機構を用いることなく、複数方向への衝撃提示とジャイロ効果の抑制を両立する固定配置型デバイスは、十分に検討されていない。

そこで本研究では、剣の振り方向に応じた多方向衝撃を提示可能なハンドヘルド型デバイスを開発した。本デバイスでは、4基のフライホイールユニットを異なる向きに固定配置し、各ユニットの単独作動および同時作動により、左、左後方、後方、右後方、右の5方向への衝撃提示を実現した。また、対向するフライホイールを配置することで、ジャイロ効果の抑制を図った。さらに、提案デバイスをVR剣戟アプリケーションに統合し、参加者が剣の振り方向に応じた多方向衝撃を体験できる環境を構築した。

## 2. 多方向衝撃提示デバイス

### 2.1 デバイス構成

我々は、VR剣戟体験において剣として両手で把持して使用するハンドヘルド型の衝撃提示デバイスを開発した(図1(a))。本デバイスは、先行研究<sup>[2]</sup>におけるブラシレスモータによって回転させたフライホイールをストッパに衝突させることで、所定方向の衝撃を生成する機構を利用した。4基のフライホイールユニットを異なる向きに配置することで、左、左後方、後方、右後方、右の5方向への衝撃提示を実現した。本デバイスの総重量は約1.6 kgであり、筐体下部には体験者が両手で把持するための柄を設けた。また、使用時の安全性を考慮し、各フライホイールの周囲を3Dプリンタで製作したカバーで覆うとともに、筐体の角に丸

\*1: 立命館大学 情報理工学部

\*1: College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University



(a) カバー装着時の外観



(b) カバーを取り外したホイール部分

図1 多方向衝撃提示デバイスの構成

みを設けた。把持部にはテープを巻き、把持時の滑りを軽減した。

筐体には、前後左右に計4基のフライホイールユニットを配置した。ユーザがデバイスを把持した状態を基準として、ユーザに近いユニットを前側、ユーザから遠いユニットを後側とする。また、ユーザから見て左右に位置するユニットを、それぞれ左側および右側と呼ぶ。

各ユニットは、ブラシレスモータ (F40 PRO V 1950KV, T-MOTOR)、ステンレス製フライホイール、ストッパ、およびストッパを駆動するプッシュソレノイド (HS-0530B, Heschen) から構成される (図1(b))。ステンレス製フライホイールは直径10 cm、厚さ4 mm、重量72 gであった。

デバイス上部には制御用のマイクロコンピュータ (ESP32 Dev Module, Espressif Systems) を配置した。マイクロコンピュータは、Electric Speed Controller (ESC) を介して4基のブラシレスモータを制御するとともに、プッシュソレノイドを駆動した。ESCにはHDZero Halo 4in1 70A ESCを用いた。また、デバイスの位置および姿勢を取得するため、デバイス上部にVIVE Ultimate Trackerを取り付けた。モータの駆動にはリチウムポリマーバッテリー (2200 mAh, 14.8 V, 120 C, 4S) を使用した。

## 2.2 フライホイールによる衝撃生成機構

各フライホイールユニットでは、先行研究<sup>[2]</sup>と同様に、ブラシレスモータによってステンレス製フライホイールを回転させた。衝撃提示時には、プッシュソレノイドによってストッパをフライホイール側へ押し出し、回転中のフライホイールと衝突させた。ストッパに加わった衝撃は、筐体を介してデバイスを把持するユーザへ伝達される。

本デバイスでは、ジャイロ効果の抑制を考慮し、各フライホイールをデバイス外側から正面に見たときに時計回りとなるよう回転させた。このとき、ストッパ



図2 フライホイールによる衝撃提示例



図3 各フライホイールユニットの衝撃方向

をフライホイールの下側に配置すると、フライホイール下端の移動方向が左向きとなるため、衝突時にはストッパおよびデバイス本体に左方向の衝撃を生成した (図2)。

また、衝突部分の破損および衝突音を軽減するため、フライホイールとストッパの衝突面には厚さ1.5 mmのシリコンゴムシートを取り付けた。衝突後は、プッシュソレノイドの作動を解除することでストッパを元の位置へ戻し、次の衝撃提示に備えた。

## 2.3 5方向の衝撃提示方法

本デバイスでは、各フライホイールユニットにおけるストッパの配置位置を調整することで、デバイス全

体に対して生じる衝撃方向を設定した。各ユニットが単独で生成する基本方向は、前側ユニットが左方向、後側ユニットが右方向、左側および右側ユニットが後方である（図3）。

前側および後側ユニットでは、ストッパをフライホイールの下側に配置した。各ユニットをデバイス外側から正面に見た場合、フライホイールはいずれも時計回りに回転するため、ストッパには左方向の衝撃が生じる。一方、前側と後側ではユニットの向きが互いに反対であるため、デバイス全体に対しては、前側ユニットが左方向、後側ユニットが右方向の衝撃を生成する。

左側ユニットではストッパをフライホイールの上側に、右側ユニットでは下側に配置した。左右ユニットは互いに反対向きに配置されているため、このストッパ配置により、いずれもデバイス全体に対して後方への衝撃を生成する。これらの基本方向を組み合わせることで、左、左後方、後方、右後方、右の5方向への衝撃提示を実現した。前側ユニットのみを作動させた場合は左方向、後側ユニットのみを作動させた場合は右方向、左側・右側ユニットを同時に作動させた場合は後方への衝撃を提示した。さらに、前側・左側・右側ユニットを同時に作動させた場合は左後方、後側・左側・右側ユニットを同時に作動させた場合は右後方への衝撃を提示した。

#### 2.4 ジャイロ効果の抑制

フライホイールの回転中にデバイスの姿勢を変化させると、ジャイロ効果によって姿勢変化に対する抵抗が生じ、把持操作に影響を及ぼす。そこで、本デバイスでは、前後および左右に対向して配置したフライホイールを、それぞれ鏡合わせとなるよう構成した。各フライホイールをデバイス外側から正面に見たときの回転方向は、すべて時計回りである。一方、対向するフライホイール同士では回転軸の向きが互いに反対となるため、それぞれの角運動量も反対方向となる。これにより、対向するフライホイールの回転によって生じるジャイロ効果が相互に打ち消されるよう構成し、把持時の操作に対する影響の抑制を図った。

### 3. VR 剣戟アプリケーション

開発した多方向衝撃提示デバイスを VR 空間内の剣として用いる VR 剣戟システムを構築した。ユーザは本デバイスを両手で把持し、実空間での動作に対応して VR 空間内の剣を操作する。剣と敵オブジェクトとの接触を検出すると、剣の振り方向に応じた多方向衝撃を本デバイスから提示する。

VR 剣戟アプリケーションは PC 上の Unity (ver. 2022.3.52f1) で実行し、PC と HMD (Meta Quest 3) との接続には Air Link を用いた。本デバイス上部には

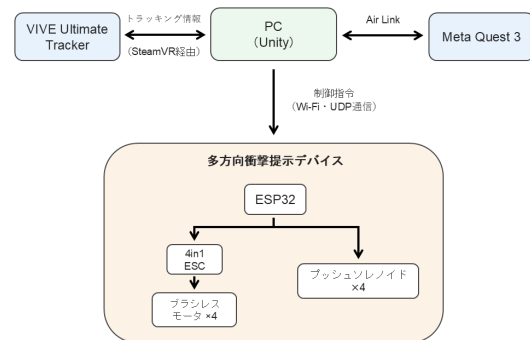


図4 VR 剣戟システムの通信・制御構成

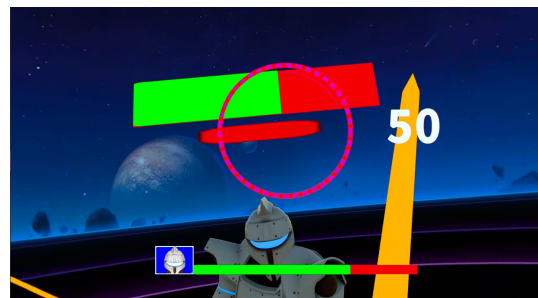


図5 VR 剣戟アプリケーションの画面

VIVE Ultimate Tracker を取り付け、PC に接続した VIVE Wireless Dongle を介して位置および姿勢を取得した。取得した情報は SteamVR を通じて Unity へ入力し、VR 空間内の剣の位置および姿勢へ反映した。

Unity は、VR 空間内の状態およびイベントに応じた制御指令を、Wi-Fi を介した UDP 通信によってマイクロコンピュータへ送信する。マイクロコンピュータは受信した指令に基づき、ESC を介して 4 基のブラシレスモータを制御するとともに、4 基のプッシュソレノイドを個別または同時に作動させる。これらの構成により、剣の振り方向に応じた多方向衝撃を提示する VR 剣戟システムを実現した（図4）。

#### 3.1 剣戟コンテンツ

本アプリケーションでは、ユーザは椅子に座った状態で、VR 空間内に出現する敵オブジェクトに対して剣による攻撃を行う（図5）。ユーザは両手でデバイスを把持するため、コントローラは使用せず、頭部の傾きによって仮想空間内を移動する。

ユーザおよび敵オブジェクトには体力を設定した。敵への攻撃が成立するとスコアが加算され、90 秒が経過するか、相手またはユーザ自身の体力が 0 になると体験を終了する。

また、ユーザの視界には攻撃可能状態を示すチャージゲージを表示した（図5）。ゲージが満たされている間は攻撃が有効となり、攻撃が成立するとゲージは 0 へ戻る。ゲージが満たされていない間は攻撃を無効とし、剣は敵オブジェクトを通過する。

### 3.2 攻撃動作に応じた衝撃提示制御

本デバイスでは、一度の衝撃提示によってフライホイールの回転エネルギーが失われるとともに、プッシュソレノイドおよびストッパを次の作動に備えて復帰させる必要がある。そのため、連続して衝撃を提示すると十分な衝撃を安定して提示できない可能性がある。そこで本システムでは、連続する衝撃提示の間に一定時間の間隔を設けるため、時間経過によるチャージ機能を導入した。

チャージゲージが満たされると、Unity は敵への攻撃を有効化するとともに、ESP32 ヘモータの回転開始指令を送信する。ESP32 は受信した指令に基づき、ESC を介して4基のブラシレスモータを駆動する。これにより、各フライホイールは回転を開始し、攻撃が成立するまで回転を継続する。攻撃可能状態で剣と敵オブジェクトとの接触を検出すると、Unity は剣の振り方向を判定する。前フレームと現在フレームの剣位置から移動速度ベクトルを算出し、これをユーザ視点を基準としたローカル座標系へ変換して水平方向の移動角度を求める。この角度に基づき、剣の振り方向を左、左後方、後方、右後方、右の5方向のいずれかに分類する。Unity は、分類結果に対応する作動指令をESP32 へ送信する。ESP32 は方向指令を受信すると、4基のブラシレスモータへ停止指令を与えるとともに、対応するプッシュソレノイドを作動させる。これにより、慣性により回転を続けるフライホイールとストッパを衝突させ、剣の振り方向に応じた衝撃をユーザへ提示する。プッシュソレノイドは作動開始から約300ms後に解除され、ストッパは元の位置へ戻る。衝撃提示後、Unity はチャージゲージを0へ戻し、敵への攻撃を再び無効化する。その後、時間経過に伴ってチャージゲージが増加し、ゲージが満たされるとモータの回転と攻撃が再び有効となる。以上の処理を繰り返すことで、剣の振り方向に応じた多方向衝撃を繰り返し提示する。

### 4. 展示

我々は、開発した多方向衝撃提示デバイスとVR剣戟アプリケーションを用いた体験を展示する。体験者は椅子に座った状態でHMDを装着し、本デバイスを両手で把持して体験する。まず、約2分間のチュートリアルを通して、VR空間内での移動方法および剣による攻撃方法を習得する。その後、約3分間のVR剣戟を体験し、VR空間内に出現する敵アバタに対して剣による攻撃を行う。敵への攻撃が成立すると、剣の振り方向に応じた作動パターンにより、本デバイスから対応する方向の衝撃を提示する。体験者は剣を振る方向を変えることで、左、左後方、後方、右後方、右

の5方向への衝撃を体験できる。

### 5. 先行展示

2026年5月17日に立命館大学大阪いばらきキャンパスで開催された「いばらき×立命館 DAY 2026」において、開発したVR剣戟アプリケーションを展示した。体験内容は4章で述べた展示と同一である。体験者は椅子に座った状態でHMDを装着し、約2分間のチュートリアルを実施した後、約3分間のVR剣戟を体験した。体験者数は60名であった。

体験後には、試作システムに対する反応を把握するためのアンケートを実施し、21名から回答を得た。その結果、攻撃時の衝撃が体験者へ十分に伝わったとする回答が多く得られた。一方で、衝撃音が大きいとする回答も多く見られた。これらの結果から、本デバイスは攻撃時の衝撃を体験者へ提示できることを確認した。一方、衝撃音の低減に加え、提示方向の知覚性についても今後評価を進める予定である。

### 6. まとめ

本研究では、VR剣戟において剣の振り方向に応じた多方向衝撃を提示するため、4基のフライホイールユニットを搭載したハンドヘルド型デバイスを開発した。各ユニットの単独作動および複数ユニットの同時作動を組み合わせることで、左、左後方、後方、右後方、右の5方向への衝撃提示を実現した。また、対向するフライホイールを対称に配置することで、ジャイロ効果による把持操作への影響を抑制した。さらに、本デバイスをUnity上で動作するVR剣戟アプリケーションへ統合し、剣と敵オブジェクトとの接触時に、剣の振り方向に応じた多方向衝撃を提示する体験を実現した。

開発したシステムを「いばらき×立命館 DAY 2026」において展示し、60名に体験してもらった。体験後のアンケートでは、攻撃時の衝撃が体験者へ伝わったとする回答が多く得られた一方で、衝撃音が大きいとする回答も多く見られた。このことから、本デバイスは攻撃時の衝撃提示を実現できる一方、衝撃音の低減が今後の改善課題であることが確認された。

今後は、各作動パターンによって実際に生成される衝撃の方向および大きさを計測し、設計どおりの衝撃が生成されているかを評価する。また、体験者実験を通して提示方向の識別性能を調査し、多方向衝撃提示手法としての有効性を検証する。さらに、衝突部および緩衝材の構成を見直すことで衝撃音の低減を図るとともに、デバイスの軽量化および耐久性の向上を進める。

## 参考文献

- [1] Yang, W. Y., Zou, Y., Huang, J., Abujaber, R. and Nakagaki, K.: TorqueCapsules: Fully-Encapsulated Flywheel Actuation Modules for Designing and Prototyping Movement-Based and Kinesthetic Interaction, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), available from (<https://doi.org/10.1145/3654777.3676364>) (2024).
- [2] Fan, C.-A., Wu, E.-H., Cheng, C.-Y., Chang, Y.-C., Lopez, A., Chen, Y., Chi, C.-C., Chan, Y.-S., Tsai, C.-Y. and Chen, M. Y.: SpinShot: Optimizing Both Physical and Perceived Force Feedback of Flywheel-Based, Directional Impact Handheld Devices, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), available from (<https://doi.org/10.1145/3654777.3676433>) (2024).
- [3] Berna Moya, J. L., van Oosterhout, A., Marshall, M. T. and Martinez Plasencia, D.: HapticWhirl, a Flywheel-Gimbal Handheld Haptic Controller for Exploring Multimodal Haptic Feedback, *Sensors*, Vol. 24, No. 3 (online), available from (<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/3/935>) (2024).
- [4] Walker, J. M., Raitor, M., Mallery, A., Culbertson, H., Stolka, P. and Okamura, A. M.: A dual-flywheel ungrounded haptic feedback system provides single-axis moment pulses for clear direction signals, *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 7–13 (2016).