



# 質量分布の高速な変化による擬似衝撃感覚ディスプレイ

清水駿太郎<sup>1)</sup>, 橋本健<sup>1)</sup>, 吉田成朗<sup>1,2)</sup>, 松村礼央<sup>1,3)</sup>, 鳴海拓志<sup>1,2)</sup>, 葛岡英明<sup>1)</sup>

Shuntaro SHIMIZU, Takeru HASHIMOTO, Shigeo YOSHIDA, Reo MATSUMURA, Takuji NARUMI,

Hideaki KUZUOKA

- 1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {s\_shimizu, hashimoto, shigeodayo, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)
- 2) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (同上)
- 3) 株式会社カラクリプロダクツ (〒 103-0021 東京都中央区日本橋本石町 2-1-1, reo@krkrpro.com)

**概要:** VR 体験において, 視覚刺激に応じて適切に触力覚刺激を提示することはユーザの没入感や体験のリアリティの向上につながる. 中でも把持物体に加わる衝撃の提示について, これまで様々な手法が提案されてきたが, 大きなレイテンシや消費電力, 連続した提示が困難である点で課題が残る. 本研究では, 把持物体の質量分布を高速に変化させるとともに, 視触覚間相互作用を利用して擬似衝撃感覚を提示する手法を提案する.

**キーワード:** 擬似衝撃感覚, 力覚インタフェース, 質量分布制御, バーチャルリアリティ

## 1. はじめに

VR 体験において, 視覚刺激に応じて適切に触力覚刺激を提示することはユーザの没入感や体験のリアリティの向上につながる. これまで, 表面の手触りや硬さ, 把持物体の形状, 重さ, 手腕に加わる牽引力や衝撃など, 様々な触力覚刺激を提示する装置が開発されてきた.

本稿では, この中でも, 特に把持物体に加わる衝撃感覚に注目する. これまで, 様々な方法で把持物体に加わる衝撃感覚を提示する装置が開発されてきた. 主な手法は, ジェットプロペラ [1, 2] やリアクションホイール [3, 4], ジャイロ効果 [5] を用いて, 実際に把持している装置に力を発生させるというものである. これらの提示手法は大きな力を発生させられる反面, レイテンシや消費電力が大きい, 連続して衝撃感覚を提示できないといった問題点をもつ. 大きなレイテンシは視覚刺激に対する触覚刺激の遅延の原因となり, 体験のリアリティを低下させる. また, テニスや剣道など, 把持物体に連続して衝撃が加わるアプリケーションに応用する場合, 短時間で衝撃を提示し元の状態に戻す必要がある.

本稿では, 質量分布を高速に変化させることのできる機構をもった装置を使用することで, 擬似的に衝撃感覚を提示する手法を提案する. この手法は, 把持物体の慣性モーメントが高速に変化するとともに視覚的に衝撃を提示することで, ユーザの視触覚間相互作用を誘発し把持物体に衝撃が加わったと知覚するのではないかと仮説に基づく. この手法により, 従来よりレイテンシや消費電力を小さくし, 連続した衝撃感覚の提示が可能となる.

## 2. 関連研究

### 2.1 力覚提示装置

把持物体に実際に力を発生させることで, 衝撃感覚を提示する装置は多く開発されてきた.

Thor's Hammer[1] や Wind-Blaster[2] は, ジェットプロペラを回転させることで発生する風力により, 衝撃感覚を提示する. これらの装置は大きな力を発生させることができるが, 静止した状態から目標の力を発生させるまで約 500 ミリ秒かかる.

Virtual Chanbara[3] や GyroCubeSensous[4] は, フライホイールの角運動量を変化させることで装置にトルクを発生させる. これらの装置は大きなトルクを出力することができる反面, フライホイールの加減速によってトルクを発生させるためレイテンシが大きい.

iTorqU 2.0[5] は, 2 軸のジンバル機構を搭載し, フライホイールの自転軸を回転させることで生じるジャイロモーメントによって衝撃を提示する. この機構は, 先述したフライホイールの加減速を用いた手法より小型な装置で大きなトルクを発生させられることに加え, 自転軸を回転させると瞬時にトルクが発生するためレイテンシも小さい. しかし, 発生するトルクの向きがフライホイールの自転軸に依存するため, 目的のトルクを連続して提示することは困難である. また, トルクを発生させるために常にフライホイールを高速回転させておく必要があり, 消費電力が大きい.

これらの手法の共通点は, 把持物体に実際に力を発生させることで, ユーザに衝撃感覚を提示する点である. この手法を用いると, 大きな力を発生させることができるが, そのためにジェットプロペラを回し続けたり, フライホイールを高速回転させたりする必要があるため消費電力が大きい.

また、短時間に連続して力を発生させることが難しく、連続した衝撃感覚の提示は困難である。

本稿で提案する手法は、提示できる力は先述した装置より小さいが、レイテンシや消費電力が小さく、より短い時間で力を提示し装置を元の状態に戻すことができるため連続した力の提示が可能である。

## 2.2 質量分布制御装置

把持物体の質量分布を動的に変化させることで、1つの装置で多様な重さや形状の物体を把持している感覚を提示する装置が開発されてきた。Shifty[6]は、重りを1軸方向に移動させることで把持物体の慣性モーメントを変化させ、多様な重さ・長さを提示できる。Transcalibur[7]は、Shiftyのような1軸方向に移動可能な重りを2つ搭載し、その移動方向をそれぞれ左右90°の範囲で変化させることにより多様な2次元形状を提示できる。これらの装置は、主に把持物体の慣性モーメントや重心位置といった静的な特性を制御し、様々な形状の物体を持っている感覚を提示する目的で用いられてきた。

本稿では、この質量分布変化をより高速に行うことで、ユーザに擬似的な衝撃感覚として知覚させられるのではないかと考える。

## 3. 質量分布の高速な変化による擬似衝撃感覚提示

本章では、人間が把持物体を振る運動と把持物体に衝撃が加わったときの運動の変化を運動方程式を用いて記述し、どのように質量分布の高速な変化によって擬似的な衝撃感覚を提示できると考えるかを説明する。

まず、人間が把持物体を振る運動は、式(1)の運動方程式で記述できる。

$$I\ddot{\theta} = T_h \quad (1)$$

なお、 $I$ は把持物体の把持点まわりの慣性モーメント、 $\ddot{\theta}$ は角加速度、 $T_h$ は人間が把持物体に入力するトルクである。次に、この運動中に外力によるトルク $T_e$ が加わると、式(1)は瞬間的に、

$$I\ddot{\theta} = T_h - T_e \quad (2)$$

と変化する。人間は、この運動の変化を「把持物体に力が加わった」と知覚すると考える。

本稿では、質量分布を高速に変化させることにより、式(1)を、

$$(I + I_d)\ddot{\theta} = T_h \quad (3)$$

と変化させる。なお、 $I_d$ は、質量分布を変化させることで増加/減少する把持物体の慣性モーメントである。これと同時に、視覚的に把持物体に何らかの衝撃が加わった情報を提示することで、ユーザは、

$$I\ddot{\theta} = T_h - I_d\ddot{\theta} \quad (4)$$

のように、 $I_d\ddot{\theta}$ の外部トルクが加わったと錯覚するのではないかと考える。また、慣性モーメントの変化 $I_d$ を制御することで、多様な大きさの衝撃感覚を提示することが可能であると考える。

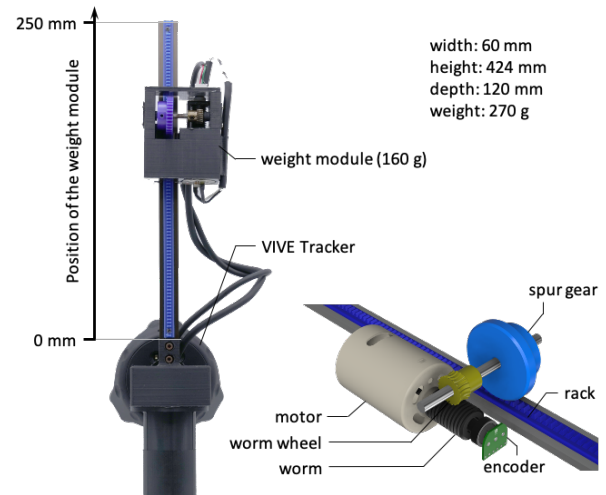


図 1: 擬似衝撃感覚ディスプレイのプロトタイプ

## 4. 擬似衝撃感覚ディスプレイのプロトタイプ

### 4.1 ハードウェア

Transcalibur[7]のウォーム機構を用いたリニアアクチュエータを参考に、図1のプロトタイプを作成した。

プロトタイプは、PLA樹脂製の手持ち部、動力部(重り)、厚さ3mmのアルミニウム板でできたレール部で構成される。また、大きさは60×424×120mmであり、重量は270gである。動力部は、マブチモーター社のRS-380PHと減速比10:1のウォームギア、ピニオンギア、Pololu社の磁気式エンコーダで構成され、大きさは58×70×35mm、重量は160gである。モータの出力がウォームギアを通してピニオンギアに伝達し、レールの上に固定されたラックの上を重りが移動する。なお、このウォーム機構により、従動部に入力されたトルクが駆動部のモータに伝わらない、Non-backdrivableな機構となっている。このため、外力が加わった場合でも重りは動かない。

また、モータはCytron社のモータドライバMDD10Aを通してマイクロコンピュータTeensy3.2に接続されており、これを用いて制御する。なお、この装置の最大消費電力は、10V/5Aである。

### 4.2 ソフトウェア

PID制御を用いて、重りの速さを制御する。重りの位置はエンコーダを用いて計測されており、目標の位置±15mmの範囲内に重りが到達したときにモータを停止する仕様となっている。この範囲は、モータを停止する信号を送信してから実際にモータが停止するまでの遅延を考慮して設定されている。なお、重りの目標速度は1mm/msecに設定されており、レールの端から端まで、約150ミリ秒で移動可能である。これにより、この装置は約300ミリ秒の間に、衝撃感覚を提示し元の状態に戻すことが可能である。

## 5. 実験: 提案手法による擬似衝撃感覚提示の検証

### 5.1 実験概要

以下の2点を検証する実験を実施した。

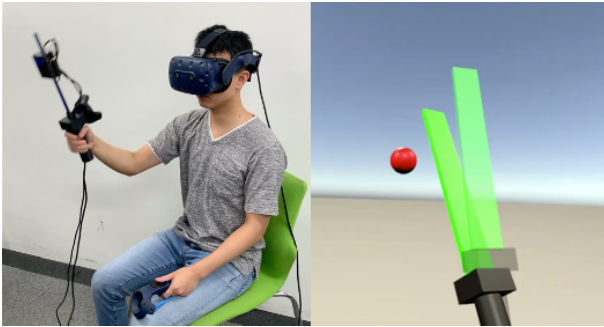


図 2: デバイスを振り、VR 空間でボールを打ち返す様子

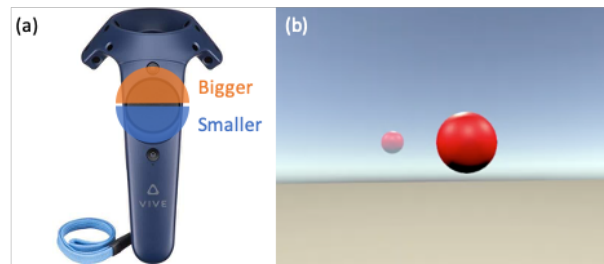


図 3: VIVE Controller (a) を用いてボールの大きさを操作する (b, 右). なお, 操作するボールの隣に対照条件の大きさが表示されている (b, 左).

1. 提案手法を用いて、擬似的な衝撃感覚を提示できるか
2. 重りを動かす位置を変化させることで、様々な大きさの衝撃感覚を提示できるか

実験参加者には、把持した装置を振ることで、VR 空間でこちらに向かって発射されるボールを打ち返すタスクを行わせた (図 2). その際に、重りを特定の位置まで動かす力を生じさせた。なお、ボールを打ち返す際、実験参加者の動きを誘導する半透明のデバイス (ゴーストデバイス) を設け、実験参加者はこれに追従する形でボールを打ち返した。ゴーストデバイスを設けた理由は、式 (4) を考慮すると、知覚する衝撃感覚の大きさはユーザのデバイスを振る角加速度に依存することが予想されたため、実験参加者間のその要因による知覚誤差を排除するためである。

また、実験参加者はデバイスを振ったときに知覚した力の大きさに応じて打ち返したボールの大きさを回答した (図 3). 一般に、打ち返すボールが大きいほど生じる衝撃は大きくなるため、回答されたボールの大きさは実験参加者が知覚した衝撃感覚の大きさを反映していると予想した。

## 5.2 実験手順

実験は説明、試行、休憩、アンケートで構成され、実験参加者 1 人あたりの所要時間は約 45 分であった。なお、実験は以下の手順で行われた。

1. 実験説明
2. キャリブレーション
3. チュートリアル
4. 対照条件試行

5. 実験条件試行
6. 休憩
7. 2, 4, 5 を再度実施
8. アンケート

実験参加者は手順 2 から 5 の間、Head Mounted Display (HTC VIVE Pro) を装着し、右手に同社製の VIVE Tracker を搭載した実験デバイスを、左手に VIVE Controller を把持した。

手順 3 では、ゴーストデバイスにあわせて実験デバイスを振りボールを打ち返すタスクの練習を行った。なお、この練習は実験参加者が動作に慣れるまで行った。また、この手順で VIVE Controller によるボールの大きさの操作も行い、その操作方法を確認するとともに入力できる大きさの最大値・最小値を確認させた。この最大値・最小値は、それぞれ直径 270 mm と 30 mm であった。

手順 4 では、対照条件として設定された力覚とボールの大きさとタスクを行い、基準となる力の大きさとボールの大きさの関係を確認させた。基準となるボールの大きさは直径 90 mm であった。その後、手順 5 にて、実験条件として設定された力の大きさとタスクを行い、対照条件と比較することでその力の大きさに応じた適切なボールの大きさを回答させた。実験参加者は、回答した大きさのボールを打ち返すタスクを繰り返し、実験デバイスによる力の大きさとボールの大きさが最も適切であると判断したところでその実験条件の試行を終了とした。なお、対照条件の重りの位置は 75 mm、実験条件は 0, 30, 60, 90, 120, 150 mm であり、各実験条件はランダムな順序で適用された。

手順 8 のアンケートの内容は以下のように設定した。

1. ボールを打ち返したように感じた。
2. ゴーストデバイスにあわせてデバイスを振るのは簡単だった。
3. 実験や体験について何か感じたことがあれば教えてください。
4. このシステムは、どのようなアプリケーションに活用できると思いますか。

なお、質問 1, 2 は 7 段階のリッカート尺度による選択式であり、質問 3, 4 は自由記述式であった。

## 5.3 実験参加者

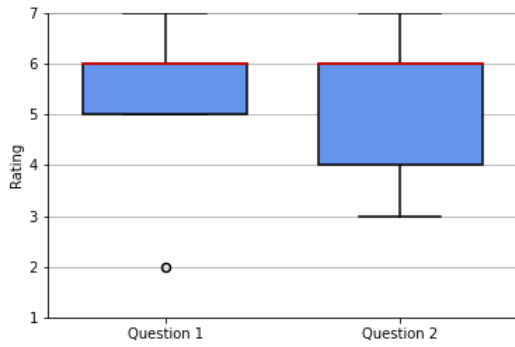
実験参加者は 7 名 (男性 7 名, 年齢  $23.14 \pm 1.12$  (SD) 歳) であり、全員の利き手は右手であった。実験参加者には、謝礼として Amazon ギフト券 1,000 円分を贈呈した。

## 5.4 結果と考察

図 4 は、先述したアンケートの質問 1, 2 の回答結果を表す箱ひげ図である。

まず、質問 2 については、全体的に高い評価を得られた。これにより、設定されたゴーストデバイスの動作は実際のユーザの動きと大きく乖離したものではなかったことがわ





Q1: ボールを打ち返したように感じた。  
Q2: ゴーストデバイスにあわせてデバイスを振るのは簡単だった。

図 4: アンケート結果

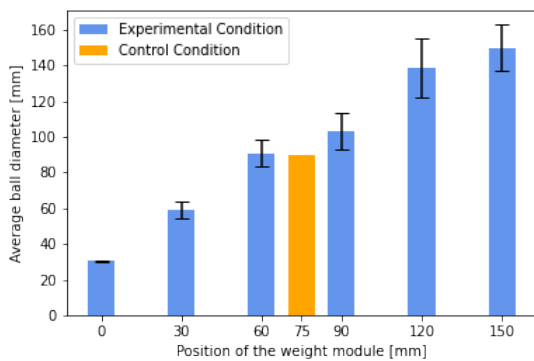


図 5: 各条件の重りの位置と回答されたボールの大きさの平均値。エラーバーは標準誤差を表す。

かる。また、実験参加者は期待通りの運動を行うことができ、本実験で得られたデータは有効性が確認できた。

次に、質問 1 についても、全体的に高い評価を得られた。さらに、質問 4 の回答例として「クリケット」「剣道」「テニスなどのラケット球技」といった、把持物体に衝撃が加わるアプリケーションが多く見られた。これらの結果を踏まえ、5.1 節で挙げた検証項目 1 である「提案手法を用いて、擬似的な衝撃感覚を提示できる」ことが示唆された。

図 5 は、各条件の重りの位置と、回答されたボールの大きさの平均値と標準誤差を表す棒グラフである。重りの位置によって、知覚された衝撃感覚の大きさが変化したことがわかる。これにより、検証項目 2 である「重りを動かす位置を変化させることで、様々な大きさの衝撃感覚を提示できる」ことが示唆された。また、この 2 値の間の相関係数は約 0.74 と大きく、正の相関関係にあると言える。この関係は、重りの位置が先端になるほど装置の慣性モーメントは大きくなるため、仮説として記述した式 (4) と矛盾しない。さらに、力が大きくなるほど回答されたボールの大きさの標準誤差が大きくなった。これにより、刺激が大きくなるほ

ど知覚誤差が大きくなるという知覚特性が示唆された。

## 6. おわりに

本稿では、装置の質量分布を高速に変化させるとともに、視覚的に把持物体に何らかの衝撃が加わったという情報を提示することで、擬似的な衝撃感覚を提示する手法の提案と検証を行った。検証の結果、提案手法を用いてユーザーに衝撃感覚を提示できることが示唆された。さらに、重りの位置と知覚する衝撃感覚の大きさの間に正の相関関係が見られ、運動方程式を用いて記述した式 (4) と矛盾しない結果が得られた。

今後は、本稿の提案手法が成立する重りの速さの閾値を調査したり、ある特定の大きさの衝撃感覚を提示する際の重りの動かし方の指針を確立することにより、この手法を利用して、様々な衝撃感覚を提示するシステムの構築を目指す。

## 参考文献

- [1] 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*, pages 1–11, 2018.
- [2] S.Je et.al. Wind-blaster: a wearable propeller-based prototype that provides ungrounded force-feedback. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, pages 1–2. 2018.
- [3] D.Koga et.al. Virtual chanbara. In *ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications*, pages 83–83, 2002.
- [4] N.Nakamura et.al. An innovative non-grounding haptic interface 'gyrocubesensuous' displaying illusion sensation of push, pull and lift. In *ACM SIGGRAPH 2005 Posters*, pages 92–es. 2005.
- [5] K.N.Winfree et.al. A high fidelity ungrounded torque feedback device: The itorqu 2.0. In *World Haptics 2009-Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 261–266, 2009.
- [6] A.Zenner et.al. Shifty: A weight-shifting dynamic passive haptic proxy to enhance object perception in virtual reality. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(4):1285–1294, 2017.
- [7] 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*, pages 1–11, 2019.