

令和 6 年 9 月 13 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01127

研究課題名（和文）VR/AR空間における広域な移動と重力感覚の提示が可能な全身型力覚提示スーツ

研究課題名（英文）Whole-body force feedback suits capable of rendering gravity sensation in wide area VR/AR space.

研究代表者

中村 太郎（NAKAMURA, TARO）

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：50315644

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：現在VR/AR空間ではHMDによる視覚的情報の提示が多く用いられている。しかしスポーツやリハビリ等の分野における能動的な動作のアプローチに対して、よりリアリティのある環境を実現するためには「力覚」の提示が必要不可欠である。本研究では、申請者が開発している人工筋肉と機能性流体で構成された可変粘弾性機構を用いることで、軽量でありながら機構的に高機能・高出力な力覚を提示できる「全身装着型力覚提示デバイス」を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発された装着型力覚提示装置は、全身の力覚や落下感覚を提示することができる。この装置は、上肢双腕・下肢・落下感覚提示シューズに分かれており、VRやAR空間において、広範囲に移動しながら、様々な力覚や落下感覚を提示可能となる。

これらの成果は、VR/AR空間における体験のリアリティ向上に寄与するだけでなく、スポーツやトレーニング、リハビリテーション等のフィジカルインターアクションにおける様々なシーンにおいても新たなアプリケーションの可能性を拓くことができる。今後は、より実用的なシステムへの展開や臨床評価を行い、実世界での有効性をさらに確認していく予定である。

研究成果の概要（英文）：In the current VR/AR space, visual information is predominantly provided through HMDs. However, in fields like sports and rehabilitation, achieving a more realistic environment requires the presentation of "force feedback" for active movements. This research introduces a "full-body haptic feedback device" developed by the applicant, utilizing a variable viscoelastic mechanism composed of artificial muscles and functional fluids. This device, divided into upper limb, lower limb, and falling sensation shoes, enables haptic feedback during various activities such as grasping objects in space, moving underwater, and simulating falls while navigating VR/AR environments.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

キーワード：力覚提示スーツ バーチャルリアリティ 可変粘弾性 落下感覚提示 ソフトアクチュエータ

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、ゲームや OJT(On the Job Training)の分野をはじめとして、VR(Virtual Reality)や AR(Augmented Reality)が一般にも浸透するようになってきた。しかしその多くの情報伝達手段はヘッドマウントディスプレイ (以下: HMD) による視覚情報の提示のみが用いられている。これは HMD の装着の容易さや伝達される情報量の多さが圧倒的であるためである。またハプティクス分野においては、触覚情報の提示デバイスも HMD と同様に小型軽量化が進んできており、今後多く適用されるものと考えられる。

一方、力覚の情報提示はより大きいアクチュエータや制御システムが必要となり、装置が複雑化するため適用される例が少ない。しかしながら、力の感触を形容する語彙は視覚のそれに比べて極めて少ないため表現方法が少ない。よって他人にその感覚を伝達したり、共感させることが難しく、個人的体験によって得られる感覚に頼っているのが現状である。したがってリハビリテーションやスポーツ等の力学的な接触が重要な分野の VR/AR 空間への適用や、よりリアリティのあるゲーム等の能動的な動作に対する仮想物体の感覚の提示にとっては力覚の要素が必要不可欠であると考えられる。

現在広く研究開発されている力を提示する部位の大半は手先・指部である。また腕をはじめとした上肢の力提示もリハビリテーション等の限られた応用分野として存在する。しかしながら、現在の視覚情報だけで十分カバーできないリアリティのある力の提示を目指すためには図 1-1 に示すような、上肢だけでなく下肢における歩行や重力感覚(COG の鉛直加速度変化)を含めた全身の力覚提示が必要であると考えられる。



図 1-1 VR 空間の装着型力覚提示システム概要

以上より、「広域な移動と重力感覚の提示が可能な全身力覚提示スーツ」を実現することによって VR/AR の応用の可能性が大きく広がると考える。一方、上肢や下肢にわたる全身の力覚提示が可能になると、視覚情報と力覚情報の相互的な作用の解明が重要になると考える。また、ベクションを含めた視覚情報からの誘導的な錯覚効果による重力の知覚作用も報告されている。申請者らは、これらの錯覚による現象も含めた視覚情報と力覚情報が、お互いにどのような効果で人の物体に対する認知に影響を与えているのかを検証する必要があると考えている。

2. 研究の目的

本研究では、「広域な移動」と「重力感覚の提示」を可能にする全身型力覚提示スーツを提案し、視覚と力覚における人間の感覚や知覚の相互作用の効果を解明する。

まず本申請では人工筋肉と MR デバイスを用いた可変粘弾性アクチュエータにより軽量で広域に移動可能なウェアラブルな力覚提示スーツを実現する。

本スーツは上肢に装着可能な「上肢力覚提示スーツ」、下肢に装着可能な「下肢力覚提示スーツ」と靴のように装着することで自由に歩き回る「足底部(シューズ)」に分かれている。それぞれの目的は以下のとおりである。

- ① 広範囲の空間について片腕 4 自由度の装着型力覚提示装置を開発し、移動に伴う力覚提示感覚や動作主体感について検証する。
- ② 下肢に外骨格を有する下肢力覚提示装置を開発し、水中の歩行やボールのキッキング動作を使って、仮想空間においても十分なリアリティを持ったシステムを構築する。
- ③ 落下感覚を中心とした重力感覚提示装置として、「落下感覚提示シューズ」を提案し、数十 m 程度の落下に対して、わずか数センチ程度の落下しかしていないような、「重力感覚提示シューズ」を提案し、その基礎特性および本シューズによる落下感覚提示を実現する。

3. 研究の方法

3.1 上肢力覚提示装置

3.1.1 装着型力覚提示システムの概要

本装置の制御システム全体の概要を図 3-1-1 に示す。装置関節部のエンコーダから装置の関節角度を受信し、Simulink で作成した制御系に適用する。dSPACE はこの制御系を元に、力覚提示装置を制御する。

3.1.2 装着型上肢力覚提示装置

装着型の力覚提示装置の課題について人は筋疲労により外力を過大評価する傾向にあるため、力覚提示装置がユーザに身体的負担をかけるのは好ましくない。そこで傘歯車を用いた伝達機構を組み込み装置の自由度配置を肩 2, 肘 2 自由度から肩 3, 肘 1 自由度に変更して腕部の部品をユーザの体幹近くに集約することで腕にかかる負荷の軽減を行った(図 3-1-2)。

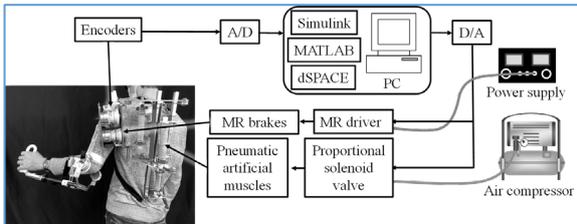


図 3-1-1 上肢力覚提示システム概要

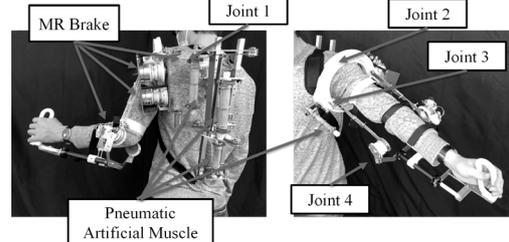


図 3-1-2 上肢力覚提示装置の概要

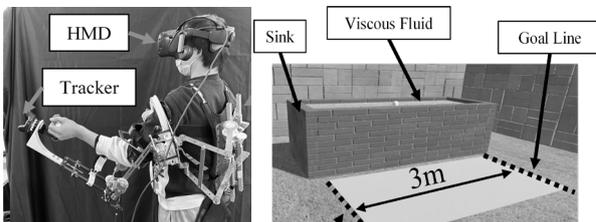


図 3-1-3 実験システム概要

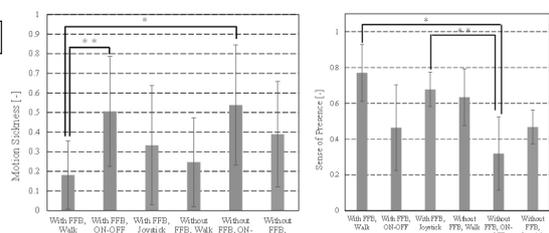


図 3-1-4 実験結果

3.1.3 直線歩行を含めた力覚提示実験

本実験では VR 空間内を移動しながら力覚提示を行い、視覚と内耳から得られる加速度を一致させること、そして仮想物体との接触に関する力覚的情報を与えることが感覚の不一致を解消し、VR 酔いの改善に有効であるか確認した。またこれと同時に「その場にいるような感覚」として定義され、匂いや触覚など視覚以外の刺激を加えることによっても向上することが報告されている臨場感に関しても力覚的刺激がどのような影響を持つかを確認した。

実験環境を図 3-1-3 に示す。被験者は VR 空間提示用の HMD と力覚提示装置を装着し、VR 空間内で仮想物体を視認しつつ接触する。また被験者の手先はトラックを取り付け付けてセンシングした。VR 空間の描画は VR 空間構築用 PC により行い、ゲームエンジンの Unity を用いた。Unity 上で構築された VR 空間では、被験者の左手の位置にグローブのオブジェクトが、被験者の左に仮想の粘性流体で満たされた水槽のオブジェクトが配置されている。グローブと粘性流体の位置関係をもとに接触判定を行い、TCP 通信で制御用 PC に送信する。制御用 PC では、Python で作成したプログラムにより、力覚提示装置への出力指令を受信し、Simulink で作成した制御系に適用する。dSPACE はこの指令と制御系を元に、提示する力を制御する。

本実験では力覚提示の条件と VR 空間内での移動方法の条件を用意した。力覚については力覚提示有無の 2 条件を設けた。「力覚提示有り」のとき被験者は装置を装着し、グローブのオブジェクトが仮想の粘性流体に触れている間、粘性を提示した。「力覚提示無し」の際には被験者は装置を装着せずに実験を行った。次に VR 空間内での移動方法に関しては被験者が実際に歩行をする「歩行移動」、被験者にタイミングを知らせず VR 空間内のみで等速移動をさせる「オンオフ移動」、被験者が VIVE Controller (HTC 社) をジョイスティックのように用いて VR 空間内のみを移動する「ジョイスティック移動」の 3 条件を設けた。

実験手順は以下の通りである。

- ① Fig. 8 の Start の位置に立ち、VR 空間内に配置した水槽の流体を進行方向にかき上げる。
- ② 流体をかき上げながら図の Goal の位置に向かって移動する。このとき Goal に辿り着く前に一度は停止する。
- ③ Goal に辿り着いた後、Start の位置に戻る。
- ④ 水槽の水をかき上げながら再び Goal の位置に向かって移動する。このとき Goal に辿り着くまで停止しない。

以上を 1 試行とし、実験条件分繰り返した、各試行後被験者は以下のアンケートに回答した。

Q1: 酔いを感じた。

Q2: 実際にその場にいるように感じた。

ここで各質問に対し、0 を「全くそう思わない」、1 を「強くそう思う」とする VAS を用いて回答した。回答集計後、SPSS (IBM 社) を用いて Friedman 検定を行い、全条件のペアに対して対比較を行った。有意水準は 5% とし、対比較の有意確率は Holm 法により決定した。

Q1, Q2 の回答の平均をそれぞれ図 3-1-4 に示す。Q1 の「酔い」に関して、「力覚提示有り、歩行移動」と「オンオフ移動」の間で有意差が見られた。これは被験者が自身で移動のタイミングを選べない「オンオフ移動」が実体験から予測しにくい動作なのに対して「力覚提示有り、歩行移動」が最も実体験から予測がしやすく感覚情報の不一致が起りにくい条件であることに起因したと考える。Q2 の「その場にいるように感じた」について、「力覚提示有り、歩行移動」と「力覚提示有無し、オンオフ移動」の間、「力覚提示有り、ジョイスティック移動」と「力覚提示有無し、オンオフ移動」の間で有意差が見られ、いずれのペアでも「力覚提示有り」の条件の方が望ましいスコアを出した。これにより複数の感覚提示が臨場感を高めたと考えた。

3.2 下肢力覚提示装置

3.2.1 下肢外骨格型力覚提示装置と実験システム

本装置のシステム構成を図 3-2-1 に示す。本装置のシステムは VR PC と Control PC の二つから構成される。VR PC は身体に取り付けたポジションセンサ (Vive Tracker) や、HMD からユーザの姿勢を取得する。そして VR PC は 3DCG ソフト (Unity) を使用して現実世界の身体の動きと同期した VR の映像をレンダリングする。この時、身体と仮想物体との衝突を VR PC 内で計算し、衝突があった場合には衝突判定が VR PC から Control PC にリアルタイムに送信される。Control PC 側では装置の関節トルクを制御しており、VR PC から受け取った衝突の信号に応じて制御を行う。次に開発した下肢外骨格型力覚提示装置の詳細について述べる。開発した下肢力覚提示装置を図 3-2-2 に示す。装置は大きく分けて関節ユニットとリンク部分から構成される。関節ユニットは磁気粘性流体ブレーキと遊星歯車減速機およびロータリーエンコーダから構成される。

3.2.2 水中動作感覚提示手法

本章では、水中動作感覚の力覚提示手法について検討を行い、本研究で実施する実験で用いる力覚提示の 2 種類の簡易モデルを提案する。

まず、力覚提示にて流体中の運動感覚再現する方法について考える。流体中での運動感覚を再現するためには、流体中の物体にかかる力を、装置にて再現する方法が考えられる。そこで、上肢の力覚提示においては流体力のモデルを単純化されたものがしばしば用いられる。単純化された流体力の成分の代表例としては、抗力、揚力、付加質量による慣性力、浮力等がある。流体中での動作感覚を再現するにあたり本研究では、流体中での速度に起因する抗力と、流体中での加速度に起因する付加質量による慣性力から着想を得て力覚提示モデルの設計を行った。

- ・抗力：水などの流体中を移動する物体は流体から抵抗力を受ける。この時、流れに対して平行で同じ向きに受ける力を抗力 (drag) と呼び次式で与えられる。

$$f_D = 1/2 \rho C_D S_A U^2$$

ここで C_D は抗力係数であり物体形状やレイノルズ数に依存する。 ρ は流体の密度 S_A は抗力方向に垂直な面への物体の投影面積、 U は物体と流体の相対速度を表す。抗力 f_D はレイノルズ数の大きさによって 2 種類に分類される。粘性抵抗と慣性抵抗である。物体と流体との相対速度が小さく流体の粘性が大きい場合、粘性抵抗が物体に働き、抗力は速度に比例する。また、相対速度が大きく粘性が小さい場合は慣性抵抗が支配的になり、抗力は速度の 2 乗に比例する。水中移動時や水泳時などの場合の抵抗は、一般的に後者の慣性抵抗が支配的となる。

次に付加質量による慣性力について検討する。流体中の物体を加速させるとき、物体の周囲の流体も共に加速されるため、それに相当する分だけ余分にエネルギーが消費される。この時に物体はあたかも質量が増加したかのように慣性力が増大する。このみかけの質量の増大分を

付加質量と呼ぶ。流体内の物体が加速度を持つとき付加質量を m' 、加速度を a とおくと、流体から受ける付加質量による慣性力(付加質量力)は以下の式で表される。なお、付加質量 m' は物体の形状により決定される。

$$f = m' a \quad (2)$$

上式より、付加質量力は流体内部の物体の加速度に依存する。下肢の運動は上肢の運動とは異なり関節を頻繁に揺動させる往復運動であるため、加速度の変化が大きい。そのため、下肢運動に対しては抗力のみだけでなく付加質量力も感覚提示に大きく寄与すると考える。

3.2.3 抗力・付加質量力モデル比較実験

本実験の目的は外骨格型下肢力覚提示装置で膝に対し水中動作感覚提示を行った際の提示性能の検証、および抗力・付加質量力モデルの比較である。

被験者は実験前に水を溜めた現実空間の水槽で脚を前後に動かす体験を行った。アルミフレームとブルーシートで構築した水槽(440 × 760 × 600 mm)を用いて、水深は 450 mm とした。水中動作する際は、皮膚感覚の影響を極力排除するためにポリ袋(厚さ 0.08 mm)で下肢を覆った。

実験環境を図 3-2-3 に示す。被験者は HMD と外骨格装置を装着した状態で椅子に座る。外骨格の股関節部分は椅子に固定した。足先の Vive Tracker により VR 上の足の位置と現実の足の位置を同期している。また本実験において被験者に提示する VR コンテンツの映像を図 3-2-3 に示す。水面の質感の再現には、VR 用の水シェーダ”Interactive Water V2” [7] を使用した。本シェーダは、水に触れた箇所を中心に波紋の広がりを描画できる。VR 空間内に足型のオブジェクトを配置し、装着者の足の動作と同期させる。また足の目標軌跡が赤丸で表示され 90° から 30° の範囲を 120BPM の速さで往復している。被験者はターゲットオブジェクトに足先合わせて膝を前後に振り続ける。

次に、力覚提示条件として表示する力覚を「抗力(Drag) ($\tau = k_q \theta^2$)」条件、「付加質量(Add mass) ($\tau = k_a \theta$)」条件とした。係数はそれぞれ $k_q = 0.001$ 、 $k_a = 0.03$ とした。比較のため装置にトルクを印加しない「基底(Base) ($\tau = 1.8 \text{ Nm}$)」と、装置を外した状態の「装置なし(None)」条件を設けた。

実験手順は以下のとおりである。まず被験者として、成人男性 10 名を対象に以下の手順で実験を実施した

(1) 現実において水槽の淵に座り水の中で右足を振る。(2) 椅子に座り「装置なし」状態で VR 体験をする。(3) 右足に装置を装着し「抗力」「付加質量」「基底」の条件をランダムに体験する。

それぞれの実験動作後、被験者は VAS (Visual Analog Scale) を用いたアンケートに回答してもらい 0~100 の値でスコア化した。アンケート内容は以下のとおりである。

- ① Q1. 臨場感を感じたか(0:全く感じない, 100:とても感じた)
- ② Q2. 力の質感の近さ(0:全く近くない, 100:現実と一致)

結果の解析には多重比較検定をおこない、アンケート項目内のすべての群に対して、Dunn 検定による対比較をおこなった。このとき、有意水準は 5% とした。対比較の有意確率は Holm 法により調整された値である。

上記より得られた実験結果をしめす。装置を装着した全条件で角速度と角加速度の時系列データを取得した。全被験者の角速度の最大値は $85.8 \pm 17.2 \text{ deg/s}$ 、角加速度の最大値は $309.4 \pm 72.2 \text{ deg/s}^2$ であった。また、角速度、角加速度において時系列データの絶対値を平均した。全被験者の全条件における角速度の絶対値平均は $44.3 \pm 8.3 \text{ deg/s}$ 、角加速度の絶対値平均は $122.8 \pm 21.9 \text{ deg/s}^2$ であった。各条件ごとに、角速度や角加速度の最大値と絶対値平均に大きな差は見られなかった。アンケート結果を図 3-2-4 に示す(a)は臨場感のアンケート結果の箱ひげ図である。付加質量条件と装置なし条件の間に有意差が見られた。中央値で比較すると、装置なしの条件が最も低くスコアは 44 であった。一方、抗力条件のスコアは 59、付加質量条件ではスコアが最も高く 67 であった。以上より、映像のみでもある程度の臨場感が与えられているものの、さらに装置による力覚を与えることで臨場感が向上することが分かった。次に力の質感の一致度のアンケート結果を(b)に示す。装置なし条件と基底条件でスコアが低い結果となった。一方で抗力条件の中央値が 57、付加質量条件でのスコアが 70 と比較的高い結果が得られた。このことから、力の感触の再現には力覚提示が有効であると考えられる。また抗力条件と付加質量条件を比較すると付加質量条件のスコアが高く、ばらつきも小さい。以上のことから水中での下肢動作の力覚提示においては抗力よりも付加質量力の寄与が大きいと考える。

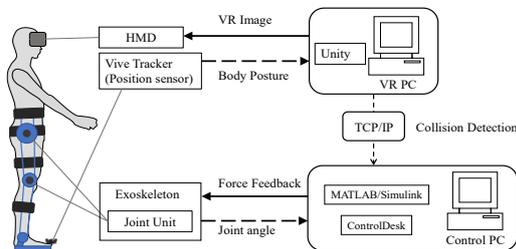


図 3-2-1 下肢力覚提示システムの概要

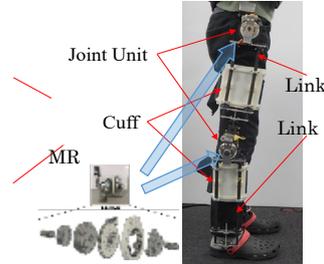


図 3-2-2 下肢外骨格力覚提示装置の概要

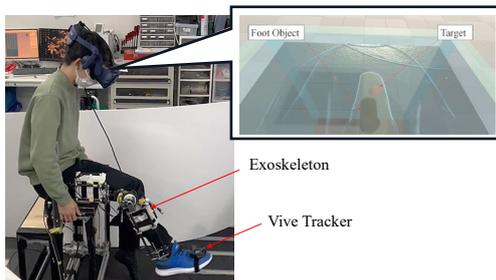


図 3-2-3 下肢水中動作感覚実験の様子

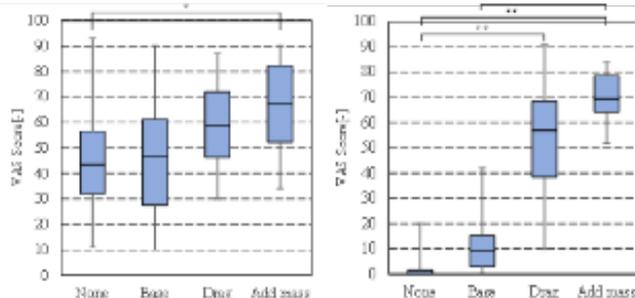


図 3-2-4 下肢水中動作実験の実験結果

3.3 落下感覚シューズ

3.3.1 落下感覚と落下加速度の検証

まず、実際の人の落下動作を伴う、下肢装着型力覚提示装置による落下感覚の現実感向上に着目した。これを実現するにあたり、装置の大きさに制約がある中で VR 空間における長い落下距離を装置で提示する手法の確立が課題であった。そこで、図 3-3-1 に示す落下開始と着地の瞬間のみを映像と同期させる 2 段階落下動作のモデルを提案した。本落下モデルは落下時の加速度に着目し、落下開始時の加速と着地時の減加速を提示することで長距離の落下感覚を疑似的に再現する。先行研究では本手法について、ジャッキを用いて実際にヒトを落下させる実験を行い、VR 映像との相乗効果を検証した。その結果 75 mm の落下距離、 -1120 mm/s^2 の落下加速度、 1000 mm/s^2 の減速加速度を与えることで、長距離落下時の感覚を再現できる可能性を示した。

3.3.2 落下感覚シューズ

開発した落下装置を図 3-3-2 エラー! 参照元が見つかりません。に示す。本装置はエアシリンダとそれを挟む上下のアルミ板で構成される。装置に使用するアクチュエータは、将来的に軽量で柔軟な空気圧ソフトアクチュエータを利用することを視野に入れ、今回は同様の空気圧アクチュエータであり比較的制御の容易なエアシリンダを採用した。本装置を圧力制御用の比例電磁弁及び管路の開閉を制御する直動電磁弁を用いて操作し、図 3-3-3 に示すように様々な負荷に対して一様な 2 段階落下を実現した。これは様々な体重の装着者に対して同様の落下動作を提示することが可能であることを意味する。この動作は前述のコンセプトに従い、1 段階目の落下を -1120 mm/s^2 程度の加速度に抑えることで、長時間の落下感覚を与えられるよう設計した。VR 映像と落下装置の落下タイミングを正確に同期するため、装置に落下指令を与えてから実際に落下するまでの無駄時間の推定を可能とした。この落下動作を利用し、装置利用者が得る落下感覚について評価を行った。

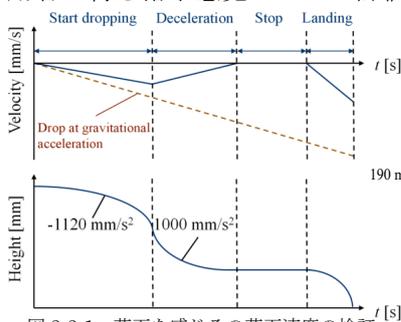


図 3-3-1 落下を感じるの落下速度の検証

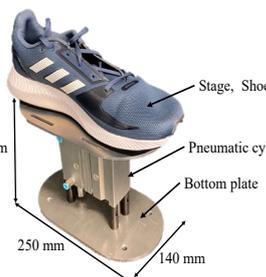


図 3-3-2 落下感覚シューズ

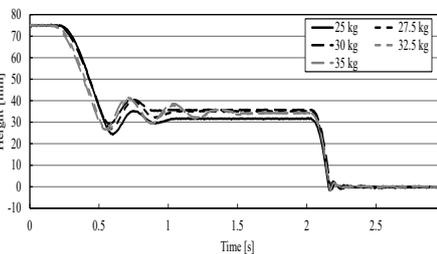


図 3-3-3 落下シューズに与える落下手法

3.3.3 落下感覚の感性評価実験

本実験の目的は、VR 映像に合わせた 2 段階落下動作の提示が、装着者に高い現実感のある落下感覚として提示できるかを検証する。高所から落下する VR 映像に合わせて落下装置を動作させたときに装着者に与える落下体験の度合いをアンケートによって評価する。

実験環境を図 3-3-4 に示す。被験者は HMD を装着した状態で落下装置の上に乗る。VR 空間内の落下に合わせて落下装置からの落下感覚提示を受ける。VR 空間は、ゲームエンジンの Unity を用いて作成した。VR 空間内の落下距離は 60 m である。落下装置で提示する落下動作は 4 条件あり、落下感覚の提示を行わない「落下動作なし (No drop operation)」, VR 空間内の落下開始のタイミングに合わせて、2 段階落下の落下開始区間と同等の落下加速度で 75 mm の落下動作を提示する「落下開始同期 (Synchronized start of drop)」, VR 空間内の着地のタイミングに合わせて 2 段階落下の着地区間と同等の落下加速度で 75 mm の落下動作を提示する「着地同期 (Synchronized landing)」, VR 空間内の落下開始および着地のタイミングに合わせてそれぞれ約 37.5 mm の落下を提示する「2 段階落下 (Two-step drop)」を提示した。順序効果の影響を避けるため、各条件の提示順序はランダムに決定した。各条件の提示後に被験者は得られた落下感について、VAS (Visual analog scale) を用いて 0 から 100 のスコアで評価した。

落下感についての VAS スコアの平均を図 3-3-5 に示す。記載されているエラーバーは標準誤差を表している。これを見ると、落下動作なし条件と比較して他の条件のスコアが高いことから、VR 映像のみを提示する場合よりも、それに同期して落下動作を提示したほうが高い落下感覚を得られることがわかる。また落下開始同期及び着地同期の条件と比較して 2 段階落下の条件のスコアが高いことから、同様の落下高さを提示する場合、単純な 1 段階の落下を提示するよりも 2 段階に分けた落下を提示する手法の方が有効であることを確認した。

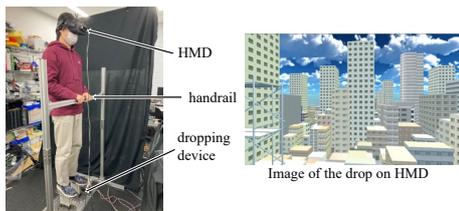


図 3-3-4 落下感覚提示実験の様子

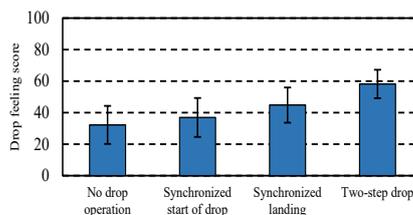


図 3-3-5 落下感覚提示実験の実験結果

4. 研究の成果

本研究は、広域な VR 空間における力覚を提示するための装着型全身力覚提示装置を開発し、それぞれ上肢・下肢・落下感覚におけるフィードバックの検証を行った。

これらの成果は、VR/AR 空間における体験のリアリティ向上に寄与するだけでなく、フィジカルインターアクションにおける様々なシーンにおいても新たなアプリケーションの可能性を拓くことができる。今後は、より実用的なシステムへの展開や臨床評価を行い、実世界での有効性をさらに確認していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 T. Fujita, Y. Shimoda, K. Machida, M. Okui, R. Nishihama and T. Nakamura,	4. 巻 11
2. 論文標題 Development of Variable Viscoelastic Joint Module Performance Evaluation and Proposal of Application Examples	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 澤橋龍之介, 保井拓巳, 西濱里英, 奥井学, 中村太郎	4. 巻 27
2. 論文標題 空気噴出を利用した力覚提示装置による身体誘導	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 264-273
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.27.3_264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ryunosuke Sawahashi, Jonah Komatsu, Rie Nishihama, Manabu Okui, and Taro Nakamura	4. 巻 35
2. 論文標題 Development of a Bimanual Wearable Force Feedback Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR Fluid Brakes and Sensibility Evaluation by Pushing Motion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 180-193,
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2023.p0180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Fujita, Y. Shimoda, K. Machida, M. Okui, R. Nishihama and T. Nakamura	4. 巻 11-3
2. 論文標題 Development of Variable Viscoelastic Joint Module Performance Evaluation and Proposal of Application Examples	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act11030089. (2022.03)	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 M. Okui, T. Tanaka, Y. Onozuka, T. Nakamura	4. 巻 18-4
2. 論文標題 Sensory Evaluation of Friction and Viscosity Rendering with a Wearable 4 Degrees of Freedom Force Feedback Device Composed of Pneumatic Artificial Muscles and Magnetorheological Fluid Clutches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Drive and Control	6. 最初と最後の頁 77-83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seigo Kimura, Ryuji Suzuki, Katsuki Machida, Masashi Kashima, Manabu Okui, Rie Nishihama, and Taro Nakamura)	4. 巻 10-1
2. 論文標題 Development of an Exoskeleton-Type Assist Suit Utilizing Variable Stiffness Control Devices Based on Human Joint Characteristics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal Actuators	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act10010017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計36件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 J. Komatsu, R. Sawahashi, T. Masuda, M. Okui, T. Nakamura
2. 発表標題 Development of Shoulder Mechanism for a Wearable Upper Limb Force-Feedback Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR Brakes
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Masuda, R. Sawahashi, J. Komatsu, M. Okui, R. Nishihama, T. Nakamura
2. 発表標題 Prototype of an exoskeletal lower limb force-feedback device for moving extensively in VR space
3. 学会等名 The 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	R. Sawahashi, T. Tanaka, T. Masuda, M. Okui, R. Nishihama, T. Nakamura
2. 発表標題	Development of Semi-active Force Feedback Shoes with MR Brake Rendering a Falling Sensation and Descent Acceleration Measurement
3. 学会等名	The 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	澤橋龍之介, 西濱里英, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題	空気圧人工筋肉と磁気粘性流体ブレーキを用いた単軸力覚提示装置によるVR空間における拡張身体に対する仮想物体の力学的特性の提示
3. 学会等名	SICEシステムインテグレーション部門講演会2022
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	澤橋龍之介, 増田大貴, 小松丈也, 石田裕己, 清水大雅, 西濱里英, 奥井学, 中村太郎,
2. 発表標題	空気圧アクチュエータと磁気粘性流体ブレーキを用いた下肢力覚提示装置の開発
3. 学会等名	The 19th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	石田裕己, 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題	VR空間内における落下時の現実感向上のための靴型力覚提示装置の開発に関する基礎検討石田裕己, 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎, "VR空間内における落下時の現実感向上のための靴型力覚提示装置の開発に関する基礎検討
3. 学会等名	2022年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 澤橋龍之介, 増田大貴, 田中俊也, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 MR流体ブレーキを用いたセミアクティブな靴型力覚提示装置の開発
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤橋龍之介, 増田大貴, 西濱里英, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 MR流体ブレーキを用いた下肢外骨格型力覚提示装置の開発と座位における水中での膝の運動感覚の評価
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤橋龍之介, 増田大貴, 小松丈也, 石田裕己, 清水大雅, 大島熙恭
2. 発表標題 Vivid Ground Generator - VR空間を足から堪能するハプティクス
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤橋龍之介, 小松丈也, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 空気圧人工筋肉と磁気粘性流体ブレーキを用いた双腕装着型力覚提示装置による粘弾性力提示
3. 学会等名 ", ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田大貴, 田中俊成, 澤橋龍之介, 小松丈也, 奥井学, 西濱里英, 中村太郎
2. 発表標題 VR空間内を自由に移動可能な装着型下肢力覚提示装置の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田大貴, 田中俊成, 澤橋龍之介, 小松丈也, 奥井学, 西濱里英, 中村太郎
2. 発表標題 VR空間内で落下感覚を提示可能な装着型足底装置の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022,
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松丈也, 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 空気圧人工筋肉・磁気粘性流体ブレーキ・傘歯車機構を有した上肢力覚提示装置による摩擦提示実験,
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤橋龍之介, 保井拓巳, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 空気噴出を利用した装着型力覚提示装置の開発と発生力評価
3. 学会等名 2022年春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Fujita, K. Machida, Y. Shimoda, M. Okui, R. Nishihama, and T. Nakamura
2. 発表標題 Investigation of Constant Velocity Motion with Physical Interaction System for Long Term Stay in Microgravity Space
3. 学会等名 Proc. 11th JFPS International Symposium on Fluid Power, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Masuda, T. Tanaka, R. Sawahashi, M. Okui, R. Nishihama and T. Nakamura
2. 発表標題 Dropping Sensation for Development of Lower Limb Force Feedback Device
3. 学会等名 Proc. 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryunosuke Sawahashi, Yuki Onozuka, Toshinari Tanaka, Manabu Okui, Taro Nakamura
2. 発表標題 Development of a Wearable Four-Degrees-of-Freedom Force Feedback Device with a Clutch Mechanism Using Artificial Muscle Contraction
3. 学会等名 2021 IEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西濱里英, 山中正雄, 中村太郎
2. 発表標題 身体の構造的特徴と機械学習を用いた作業負荷ラベル推定のための多様な身体形状でのデータセット作成
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会2021(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松丈也, 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 空気圧人工筋肉・磁気粘性流体ブレーキ・傘歯車機構を用いた装着型4自由度力覚提示装置の開発
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会2021(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤橋龍之介, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 空気圧人工筋肉と磁気粘性流体ブレーキを用いた両上肢装着型力覚提示装置による弾性力提示実験
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会2021(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Sawahashi, Y. Onozuke, M. Okui, and T. Nakamura
2. 発表標題 , "Development of a Wearable Force Feedback Device with a Clutch Mechanism Using Pneumatic Artificial Muscle Contraction
3. 学会等名 The 18th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers (TOWERS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中俊也, 増田大貴, 澤橋龍之介, 奥井学, 西濱里英, 中村太郎
2. 発表標題 下肢力覚提示装置開発のための加速時間が落下感覚に与える影響
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥井学, 保井拓己, 西濱里英, 中村太郎
2. 発表標題 空気噴出を利用した力覚提示装置の手先位置誘導への応用
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田大貴, 田中俊也, 澤橋龍之介, 奥井学, 西濱里英, 中村太郎
2. 発表標題 下肢力覚提示装置開発のための減速が落下感覚に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤橋龍之介, マイイキ, 西濱里英, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 空気圧人工筋肉と磁気粘性流体ブレーキを用いた両上肢装着型力覚提示装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤橋龍之介, 小野塚祐樹, 田中俊也, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 人工筋肉の収縮を用いたクラッチ機構をもつ装着型力覚提示装置の摩擦提示性能の定量的評価
3. 学会等名 日本フルードパワーシステム学会 2020年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中俊也, 小野塚祐樹, 奥井学, 西濱里英, 中村太郎
2. 発表標題 下肢力覚提示装置開発のための落下感覚に与える影響
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryunosuke Sawahashi, Yuki Onozuka, Toshinari Tanaka, Manabu Okui, Taro Nakamura
2. 発表標題 Development of a Wearable Four-Degrees-of-Freedom Force Feedback Device with a Clutch Mechanism Using Artificial Muscle Contraction
3. 学会等名 Proc. of 2021 IEE International Conference on Industrial Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tanaka, Y. Onozuka, M. Okui, R. Nishihama, T. Nakamura
2. 発表標題 Influence of Vertical Acceleration for Inducing Sensation of Dropping by Lower Limb Force Feedback Device
3. 学会等名 Proceeding of 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Ooba, Y. Onozuka, M. Okui, T. Nakamura
2. 発表標題 Fundamental characteristics for elasticity of a force feedback method using elastic spring and magneto-rheological fluid clutch
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on system integration (SII2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Ooba, Y. Onozuka, M. Okui, T. Nakamura
2. 発表標題 Proposal of a force feedback method using elastic spring and magneto-rheological clutch aimed to rendering friction and elasticity
3. 学会等名 The 17th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Onozuka, M. Oba, M. Okui and T. Nakamura Y. Onozuka, M. Oba, M. Okui and T. Nakamura
2. 発表標題 Rendering friction and viscosity using a wearable 4 degrees of freedom force feedback device with magnetorheological fluid clutches and pneumatic artificial muscles
3. 学会等名 Proceedings of the 45st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大場実, 小野塚祐樹, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 MRブレーキと弾性バネを用いたパッシブ型可変粘弾性提示装置の開発
3. 学会等名 秋季フルードパワーシステム講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taro Nakamura
2. 発表標題 Bio-inspired Soft Robotics: Application of Pneumatic Artificial muscle into practical uses
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Soft Robotics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野塚祐樹, 大場実, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 空気圧ゴム人工筋肉と磁気粘性流体クラッチを用いた装着型4 自由度力覚提示装置による粘性提示
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大場実, 小野塚祐樹, 奥井学, 中村太郎
2. 発表標題 弾性バネと磁気粘性流体クラッチを用いた力覚提示手法の基礎特性
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中央大学 中村研究室HP http://www.mech.chuo-u.ac.jp/~nakalab/index.html 中央大学 中村研究室 HP http://www.mech.chuo-u.ac.jp/~nakalab/index.html 装着型ARハプティクス http://www.mech.chuo-u.ac.jp/~nakalab/study/haptics/wearable.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	奥井 学 (Okui Manabu) (20823488)	中央大学・理工学部・准教授 (32641)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	西濱 里英 (Nishihama Rie) (30787172)	中央大学・研究開発機構・機構助教 (32641)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関