



# 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

Development of the Lower-limb Exoskeleton Force Feedback Device and Evaluation of Underwater Sensation of Knee Motion in Sitting Position

澤橋龍之介<sup>1)</sup>, 増田大貴<sup>1)</sup>, 西濱里英<sup>2)</sup>, 奥井学<sup>3)</sup>, 中村太郎<sup>3)</sup>

Ryunosuke SAWAHASHI, Taiki MASUDA, Rie NISHIHAMA, Manabu OKUI and Taro NAKAMURA

- 1) 中央大学 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, r\_sawahashi@bio.mech.chuo-u.ac.jp)  
2) 中央大学 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, r\_nishihama@bio.mech.chuo-u.ac.jp)  
3) 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, nakamura@mech.chuo-u.ac.jp)

**概要** : VR 空間における現実感を向上させることを目的とした下肢外骨格型力覚提示装置の片足試作機を開発した。MR 流体ブレーキを関節部に配置しており、トルク制御することにより摩擦力や粘性力を提示できる。本発表においては、提案装置により水中で膝を屈曲伸展したときの運動感覚について、現実感と抵抗力の観点から評価した。

**キーワード** : ウェアラブル, 力覚, MR 流体

## 1. はじめに

近年バーチャルリアリティ(VR)技術が発展している。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いることで、ユーザは没入感の高い VR 体験が可能となった。HMD は視覚と聴覚に刺激を与えることにより、ユーザに VR 空間を認識させることが可能である[1]。しかし、HMD のみでは VR 空間内のバーチャル物体に触れた際の反力を提示できない。そこで VR 体験の現実感向上のために力覚提示装置の開発が進められている。

現在開発されている力覚提示装置の多くは上肢を対象としている[2][3]。上肢の力覚提示装置の開発が進む一方、近年の VR コンテンツはユーザの移動範囲が広域化し、より全身を使った運動が求められる傾向にある。その背景として HMD のトラッキング技術の高性能化が挙げられる。HTC Vive[1]のような家庭用 HMD の中でも全身の動きをトラッキング可能なものが存在しており、より広範囲かつ全身をつかった VR コンテンツの実現が可能となった。このように近年の VR 体験は、アクティブな全身運動が求められている。したがって、ユーザが VR 空間内でより現実感のある体験をするためには、上肢だけではなく、下肢に対する力覚提示も有効である。

下肢に対する力覚提示には歩行感覚提示装置[4]や、階段昇降感覚提示装置[5]が開発されている。歩行感覚提示装置は靴のように装着し芝、砂、泥、雪といった様々な

路面を再現する。この装置は装着して用いるため VR 空間内を自由に移動することが可能であるが、足底の感覚のみしか与えることができない。また、階段昇降感覚提示装置は下肢に人工筋肉を装着し、階段昇降に合わせて膝関節トルクを発生させることで階段を上るような感覚を提示している。装着するため VR 空間内を自由に移動することが可能であるが、階段昇降以外の力覚を提示することができない。このような既存の下肢装着型力覚提示装置は、VR 空間内における行動の自由度が高いが、感覚提示について、1つの感覚を対象とした研究が多く、汎用性に欠ける。

そこで本研究では、広範囲な移動が可能で「ボールを蹴る」、「水中を歩く」、「階段の昇降」、「椅子に座る」、「泥濘の上を歩く」、「落下する」などの下肢の様々な感覚を提示可能な下肢装着型力覚提示装置の開発を目指す。先行研究において、ボールを蹴る瞬間に発生する撃力の提示の検証と、駆動軸の基礎特性試験を実施した[6]。

本論文では、下肢力覚提示装置の外骨格部分の開発を行い、水中感覚提示の初期検討として、膝の簡易的な水中動作モデルの構築した。そして、水中で右足を揺らしたときの運動感覚について、提案装置で提示した場合の現実感と抵抗力から評価した。

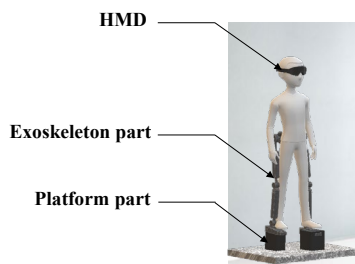


図 1: 下肢力覚提示装置のコンセプト

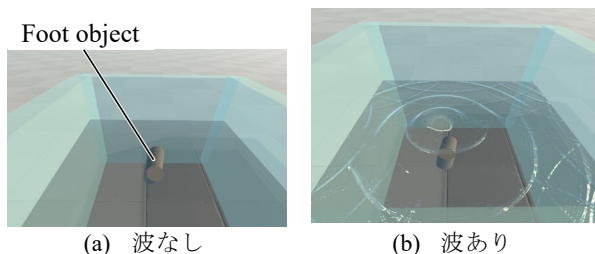


図 2: VR 映像

## 2. 下肢力覚提示装置のコンセプト

下肢力覚提示装置のコンセプトを図 1 に示す。本装置は足底部と外骨格部に分かれており、下肢に装着することで自由に歩き回ることができる。足底部分では、路面状態の違いや落下感覚の提示を行う。また、外骨格部では「ボールを蹴る」「水中を歩く」などの動作時に脚にかかる感覚を提示する。ユーザはこれらの装置のほかに HMD を装着することにより、VR 空間内の映像とそれに合わせた力覚の双方を感じることができる。

様々な感覚を装置で再現するために、本装置の外骨格部分は股関節および膝関節の屈伸方向に関節トルクを発生させるような機構を持つ。ユーザは装置を装着した状態で自由に歩き回ることが可能である。このとき位置姿勢センサにより現実空間の装着者の動きをトラッキングし、VR 空間内の脚と仮想物体との接触状態を判定する。そして、接触状態の判定に応じて関節トルクを制御することで、VR 空間内を自由に動きながら装置による様々な力覚の提示が実現可能である。

## 3. 水中での膝の運動感覚提示手法

### 3.1 VR 映像

VR における水の表現について、提示する VR 映像を図 2 に示す。水面の質感の再現には、VR 用の水シェーダ "InteractiveWater V2" [7] を使用する。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。また、足型のオブジェクトを配置し、装着者の足の動作と位置姿勢センサを用いて同期させる。

### 3.2 関節トルク提示手法

水中の膝の屈曲伸展動作における角速度に対応したトルクを膝関節部に与えることにより力覚提示する。本論文では、水中歩行動作時の関節トルクのシミュレーション[8]を参考にし、膝に加わる最大トルクを 10 Nm(最大角速度 20 deg/s)と定め、トルク  $\tau$  [Nm]が角速度  $\dot{\theta}$  [deg/s]に比例

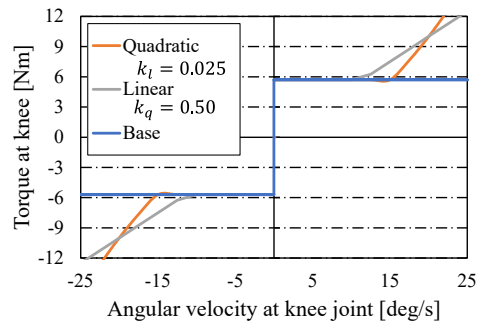


図 3: 角速度と装置で出力するトルクの関係

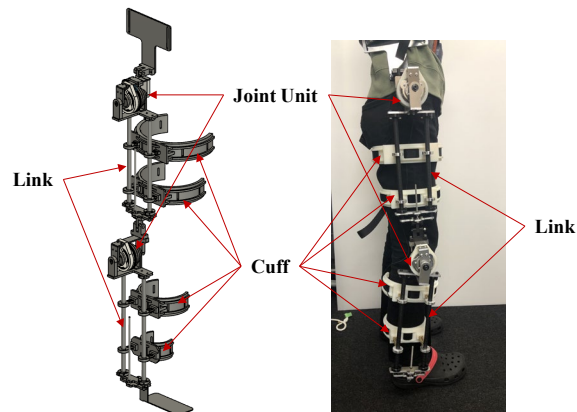


図 4: 下肢外骨格型装置の CAD 図と装着状態

する「一次(linear)」条件( $\tau = k_l \dot{\theta}$ )と速度の二乗に比例する「二次(Quadratic)」条件( $\tau = k_q \dot{\theta}^2$ )により力覚提示を行う。図 3 に膝関節の角速度と装置で出力するトルクの関係を示す。本装置の駆動軸は 5.7 Nm の基底(base)トルクがかかるため、出力が 5.7 Nm になるまでは一定力が作用する。

## 4. 下肢外骨格型力覚提示装置

### 4.1 全体構成

開発した下肢力覚提示装置を図 4 に示す。装置は大きく分けて関節ユニットとリンク部で構成される。関節ユニットは磁気粘性流体ブレーキ（以下、MR ブレーキ）と遊星歯車減速機から構成される。股関節と膝関節部に負荷となる関節トルクを発生させ、脚先に力を定義したり、トルクを直接指定したりすることにより力覚提示する[6]。リンク部分には、装置を脚に固定するためのカフとベルトがあり、関節ユニットからの出力トルクを脚全域に伝達する。リンク部分はユーザの身長に合わせて長さ調節が可能である。以上より、ユーザは本装置を装着することで、大腿及び下腿部に力覚を得ることができる。本論文では、下腿部のみを使用するため、大腿部を取り除いている。

### 4.2 磁気粘性流体ブレーキ

本研究で使用する MR ブレーキ (ER テック社)の外観と内部構造を図 5 に示す。本 MR ブレーキは、内部に磁気粘性流体を封入し、内部コアと連動して回転するディスクと、磁場を発生させるコイルで構成される。磁場が発生すると、ディスクの回転方向とは垂直に磁性粒子のク

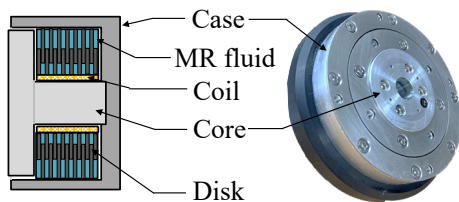


図 5: MR ブレーキの外観と内部構造

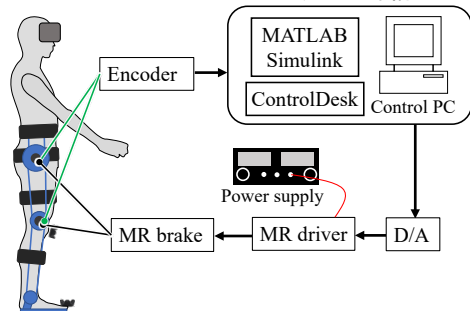


図 6: 駆動システム

ラストが形成される。ディスクを回転させることにより、クラスタが切断され、この時のせん断応力が制動トルクとして発揮される。この制動トルクは数十ミリ秒[9]で制御できる。

#### 4.2.1 駆動システム

本装置の駆動システムを図 6 に示す。本装置は MATLAB/Simulink で作成した制御系を計測用ソフトウェア ControlDesk (dSPACE 社)を用いてリアルタイムに制御する。まず、ControlDesk からの電圧指令は MR ドライバ (JW-143-2, Okatech) に送られる。次に、MR ドライバでは制御用 PC からの指令電圧値に応じた電流値を MR ブレーキに印加する。そして、MR ブレーキは印加された電流値に応じてブレーキトルクが変化する。以上の流れで MR ブレーキのブレーキトルクを制御する。関節角度はエンコーダ(MES-6-P シリーズ, MTL)で計測する。

### 5. 水中揺動実験

本実験の目的は提案装置により膝の屈曲伸展動作に対応した力覚提示をしたときの提示性能の検証および提示条件による比較である。

#### 5.1 実験環境

実験環境を図 7 に示す。現実で水中動作するための環境として、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)を用意し、水深を 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。足先のトラッキングは VIVE Tracker (HTC)を足の甲に取り付け、Base Station 2.0 (HTC)でセンシングすることで行う。

#### 5.2 実験方法

3.2 節で提案したモデルをそれぞれ「一次(linear)」「二次

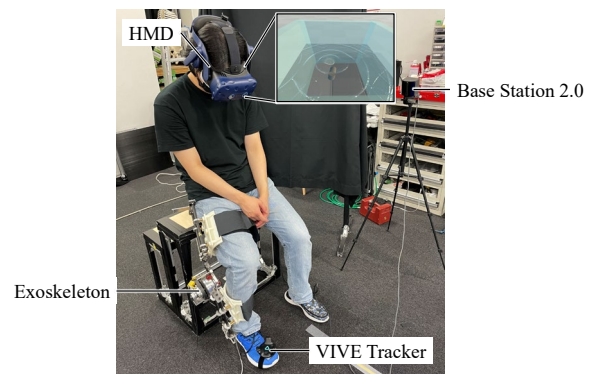


図 7: 実験環境



(a) 屈伸時 (90° ) (b) 伸長時 (30° )

図 8: 実際的水中動作の様子

(quadratic)」条件とした。また、比較のため、「基底(base)」条件の他、一次、二次条件の係数を最大角速度を 30 deg/s とした場合に合わせた「一次弱(linear weak) ( $k_l = 0.38$ )」、「二次弱(quadratic weak) ( $k_q = 0.012$ )条件と装置を装着しない「装置なし(none)」条件を設けた。

各実験方法は以下の通りである。なお、被験者は学生 9 名とした。

- (1) 現実において、図 8 に示すような水槽に下肢を覆う袋を装着した状態で右足だけ水に沈ませる。
- (2) メトロノームを 60 Hz で鳴らし、屈曲伸展各 1 秒周期で音に合わせて膝を動かす。折り返す膝関節の角度は 90° から 30° である。被験者がこの動作における水中運動感覚を十分に把握するまで続ける。
- (3) 装置を装着し、図 7 に示すような段差に腰掛ける。その状態で実験条件をランダムに提示し、(2)と同様の動作を 5 回行う。これを実験条件分繰り返す。
- (4) 最後に装置を装着せず、HMD のみ提示をした状態で同様の動作をする。(装置なし条件)

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た。アンケート内容は、以下の 2 点である。

- 1) 体験は現実的であったか。  
(0: 全く現実らしくない 100: 現実と同様)
- 2) 抵抗力を感じたか。  
(0: 全く感じない 100: とても感じた)

実験結果の解析には、統計解析ソフト R (ver. 4.1.2)を利用した。まず、現実感と抵抗力の相関についてピアソンの積率相関係数の無相関検定(有意水準 5%)により確かめた。その後、提示条件における現実感と抵抗力について、一元配置分散分析(有意水準 5%)を行った。

### 5.3 実験結果

抵抗力と現実感の相関係数は.68 ( $p<.001$ )と相関がある。したがって、今回用意したモデルの範囲においては被験者の感じる抵抗力が強いほど、現実感が高くなるといえる。

現実感と抵抗感について、一元配置分散分析はフリードマン検定を行った。その結果、群間の有意差( $p<.001$ )が示されたので、ウィルコクソンの符号付き順位和検定による多重比較を行った。現実感の結果を図 9 に、抵抗力の結果を図 10 に示す。図中グラフ上部の記号はそれぞれ、有意差\*\*: $p<.01$ , \*: $p<.05$ を意味している。現実感と抵抗力それぞれについて、装置なし条件に対して、すべての力覚提示をした条件において有意差を確認した。しかし、膝にトルクを与えた条件間で有意差が確認できなかった。これは、被験者の間で膝を揺らす速さが異なるため、角速度が想定よりも小さくなり、基底トルク以上の力を感じなくなることが原因だと考える。MR プレーキと駆動軸との間にクラッチ機構を導入し、無負荷時のトルクを減少させることにより、小さい力のフィードバックが可能になる。また、力覚提示条件を通して 6 割程度の現実感を与えることがわかる。装着時の圧迫感や前述したクラッチ機構により現実における膝が受けるトルクに近づけることにより、現実感を向上させることが可能だと考える。

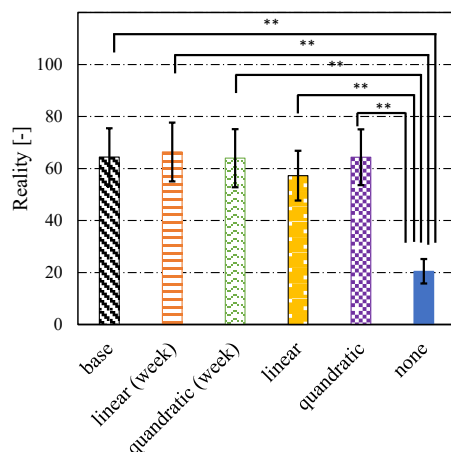


図 9: 現実感の実験結果

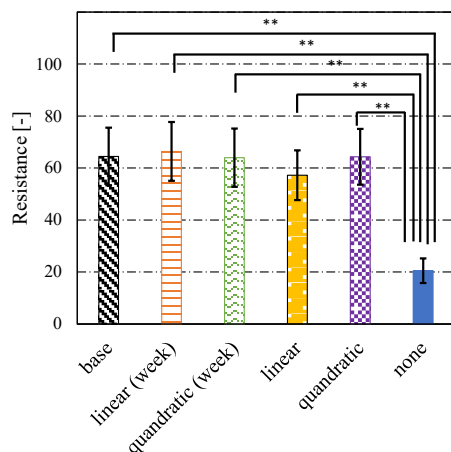


図 10: 抵抗感の実験結果

### 6. むすび

下肢外骨格型力覚提示装置を開発し、簡易的な水中動作モデルを用いて水中における膝の屈曲伸張動作に対応させた。感性評価実験の結果、装置による力覚提示は、映像のみの提示よりも現実感を向上させ、現実の 6 割程度の現実感を与えることが明らかになった。

今後の展望として、身体に触れる液体を水だけでなく、油や泥などの高粘性流体に変えた場合のインタラクションを行う。また、装置を両足に装着し、装置の膝部と股関節部双方を駆動させて水中歩行感覚を提示する。

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19H01127 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] HTC Vive, <https://www.vive.com/jp/>, Access February 25, 2022.
- [2] omega, <https://www.forcedimension.com/products>, Access February 25, 2022.
- [3] Y. Onozuka, R. Suzuki, Y. Yamada, T. Nakamura, "An Exoskeleton Type 4-DOF Force Feedback Device Using Magnetorheological Fluid Clutches and Artificial Muscles," Proc. of 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 869-874, 2018.
- [4] H. Son, S. Kim, H. Gil, J. Kim, S. Byeon, "RealWalk: Feeling Ground Surfaces While Walking in Virtual Reality", Proc. of CHI 2018 Demonstration, Montreal, QC, Canada, April, pp. 400, 2018.
- [5] T.Okumura, Y.Kurita, "Evaluation of Virtual Stair-Climbing by Visual and Force Display with a HMD and artificial muscles," 26th VRSJ Annual Conference, 2D3-7, 2021.
- [6] 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, "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", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2P2-D04, 2022.
- [7] らくとあいのブース, "InteractiveWater (VRC 向け触れる水)", <https://rakurto.booth.pm/items/1502201>, Access July 1, 2022.
- [8] 米山啓子, 中島求, 三好扶, "下肢に働く流体力を考慮した水中ウォーキングのシミュレーション", 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, セッション 403, 2006.
- [9] B. J. Park, C. W. Park, S. W. Yang, H. M. Kim, H. J. Choi, "Core-Shell Typed Polymer Coated-Carbonyl Iron Suspension and Their Magnetorheology", ERM08, p.102, 2008.