

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19844

研究課題名（和文）全身運動のための触錯覚による力覚提示装置の開発と応用

研究課題名（英文）Development and application of a haptic device with tactile illusion for whole body exercise

研究代表者

中村 拓人（Nakamura, Takuto）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号：10854036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では全身運動が伴うバーチャルリアリティ体験への力覚フィードバックを実現するために、力覚を知覚させる錯覚現象であるハンガー反射を用いた装置を開発した。本現象は皮膚のせん断変形を提示することで力覚を提示し、これまで頭、手首、腰、足首、膝で確認されてきた。本研究の成果として、新たに肘においても同様の現象が生起することを確認した。また、これまで1箇所でしか用いられてこなかったハンガー反射のデバイスを頭、肘、手首、膝に対して同時に最大7箇所へと同時に提示可能な装置を開発した。開発した装置を用いて複数箇所に対して同時にハンガー反射を提示した際の知覚力覚の特性調査を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に身体の複数部位・自由度の力覚を提示するためには対応する数のアクチュエーターが必要とされ、大型・重量の装置が必要とされてきた。本研究で開発した装置は人間の錯覚を利用しているため、比較的小型・軽量の装置で力覚提示可能となるため使用者の負担を軽減させることができる。本研究の社会的な意義は、小型・軽量の装置であるため装置の低コストでの実装が可能であるため今後の社会実装による普及が期待できる。本装置はリハビリ時の姿勢・動作支援への応用が期待できるため、より多くの利用者への普及も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, I developed a device using the haptic illusion phenomenon called the "hanger reflex" to provide haptic feedback in virtual reality experiences involving whole-body movements. This phenomenon presents the perception of haptic feedback by inducing shear deformation of the skin. It has been previously observed in the head, wrist, waist, ankle, and knee. As a result of this study, I confirmed that a similar phenomenon occurs in the elbow. Furthermore, I developed a device that can simultaneously provide hanger reflex stimulation to a maximum of seven locations, including the head, elbow, wrist, and knee, which were previously only stimulated at one location. I conducted a perceptual haptic characterization study when simultaneously stimulating multiple locations using the developed device.

研究分野：触覚

キーワード：疑似力覚 力覚提示 ハンガー反射 バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

安価なヘッドマウントディスプレイ(HMD)の発売によってVR体験が普及しつつある。また、外部接続を必要としないスタンドアロン型HMDの発売により、空間を自由に歩き回る、スポーツなどの大規模な全身運動にも対応した体験も広まっている。しかし、こうした全身で体験するVR技術の多くは視聴覚に関するものであり、触覚、特に力覚に関する技術は普及には至っていない。研究用途に販売されているが、大型・重量であるため使用者の動きを制限する課題がある。

力覚提示装置大型化の課題に対して、研究分野では偏加速度振動[1]や皮膚変形[2]などの知覚特性や錯覚を利用して「知覚としての力」を提示する手法が提案されている。強力な力覚が生起する錯覚現象に「ハンガー反射」現象がある。ハンガー反射とは針金ハンガーを頭部に装着すると強力な回転方向の力覚が生起する現象である[3](図1(a))。体験者は横方向に引っ張られるような感覚を覚え、思わず頭部を回転させてしまう。本現象は頭部への圧迫によって発生する皮膚のせん断変形が発生に寄与していることが報告されており、手首、腰、足首など頭部以外の部位へ同様の皮膚のせん断変形を適用すると同様の回転方向の力覚が生起する。ハンガー反射の制御はハンガー反射時の圧迫再現によって行われ、頭部、手首、腰部において実現している。ハンガー反射は皮膚をせん断方向に変形させる機構のみで発生させることができるため(図1(b))、従来の力覚提示装置よりも簡便・軽量の装置で力覚提示が可能であり、VR体験中の頭部への力覚フィードバックや歩行ナビゲーションへ応用されている。頭部・腰部用デバイスは4個のエアバルーンを内蔵した楕円形状フレームと制御ユニットで構成され、膨らませるエアバルーンのパターンを変更することでハンガー反射を制御する(図1(c))。エアポンプ及びバルブを搭載した制御ユニットはボディバッグに収まるサイズを実現しており、全身運動を伴うVR体験にも対応可能である。

2. 研究の目的

こうした背景に対して本研究では全身運動を伴うVR体験への力覚フィードバックの実現及び応用を目的とする。手法として触覚の錯覚現象であるハンガー反射現象を採用し、既に現象の反応が確認されている頭部、腰部、手首、足首に対して力覚提示を行う。また、新たな部位への本現象の適用を試み、制御することで本現象の応用範囲拡大も試みる。

3. 研究の方法

本研究は(1)ハンガー反射の新たな適用部位及び方向の調査、(2)各適用部位のためのデバイス開発及び提示タイミングの同期、(3)VR体験への応用の順で研究を進める。最終的にVR体験へ応用した際に評価を行い、有用性を確認する(図1(d))。

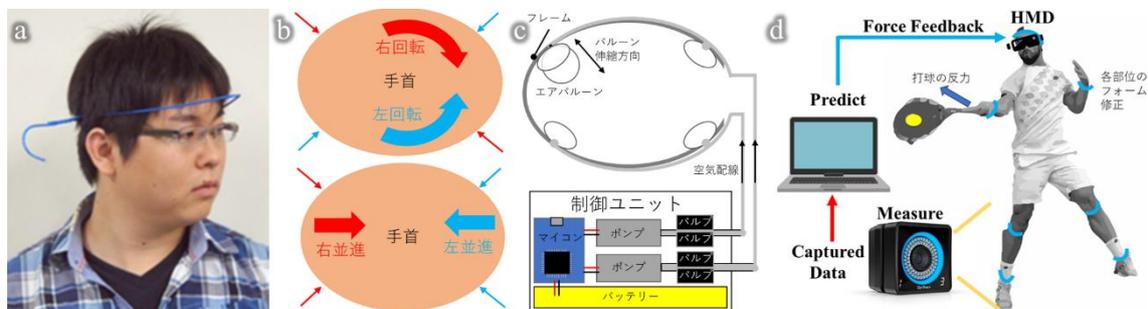


図1: (a)ハンガー反射, (b)ハンガー反射の圧迫点, (c)デバイス構成, (d)VR テニスの応用イメージ

(1)ハンガー反射の新たな適用部位及び方向の調査

本研究ではまずハンガー反射の新たな適用部位の調査を行う。本研究は全身運動に対して力覚フィードバックを試みるため、力覚提示部位が増えれば力覚提示による表現がより豊かになる。これまでの適用部位の特徴として、断面が楕円形状である点、骨と皮膚の距離に近い点がある。特徴を基に肘、肩、膝を候補とする。これらの候補部位に対して各部位用の“ハンガー”として3Dプリンタで出力した楕円形状フレームを用意する。用意したフレームによる圧迫及び皮膚せん断変形を各部位で発生させ力覚生起の有無を調査する。

(2)各適用部位のためのデバイス開発及び提示タイミングの同期

頭部及び腰部においてはエアバルーンによる圧迫を用いたハンガー反射を制御するデバイスは開発されてきた(図1(c))が、手首、足首においては実現されていない。既に開発された頭部及び腰部でのデバイスを参考に手首、足首、及び①で確認された新たな適用部位におけるハンガー

反射を制御するデバイスの開発を行う。開発した複数のデバイスを使用する際、各部位の時間応用の違いや提示刺激に対する知覚力覚が異なりタイミングや強度にずれが生じることが予想される。本研究では、各ユーザの事前キャリブレーションによってこれらに対応する。

(3)VR体験への応用

デバイスを全身運動が伴う VR でのスポーツ体験への応用する。応用先の具体的な候補としては、テニスを検討している(図 1(d))。具体的な応用は体験への力覚フィードバックとスイングのフォーム修正が考えられる。従来手法との比較実験により学習効率を比較することで、本デバイスの有用性を確認する。

4. 研究成果

研究の主な成果

(1)新たな部位への「ハンガー反射」現象の適用

当初の計画どおり、本研究ではこれまで発見されてこなかったハンガー反射適用部位発見を試みた。まず、当初の候補として挙げていた肘と肩へのハンガー反射の提示を試み、他の部位と同じく、回転方向の力覚を知覚することを確認した。また、申請者以外の研究グループによって、膝へのハンガー反射の適用が試みられ、他の部位と同様の回転方向の力覚が生起することが確認された。

肘のハンガー反射では肘の橈骨と尺骨の突起部分に圧迫が加わる位置に配置したエアバルーンによって圧迫及び皮膚のせん断変形を提示した(図 2)。実験参加者の肘に開発したデバイスを装着させ、回内・回外の 2 種類の刺激をランダムに提示し、知覚した力覚方向を回答させた。実験の結果、提示方向と回答方向の一致率がチャンスレートよりも有意に高かったため、本装置での任意方向への力覚提示が確認された。



図 2：肘でのハンガー反射。(左)各方向提示に必要な圧迫及び皮膚変形方向，(中央)デバイス及び装着の様子，(右)回内方向の肘ハンガー反射

肩でのハンガー反射では、肩及び脇への圧迫提示による回転方向の皮膚せん断変形を提示することで、前傾・後傾方向への力覚知覚が確認された(図 3)。肩でのハンガー反射では実験条件を統制した被験者実験は実施していないが、10 名以上の使用者にたいてはデバイスを適用した



ところ、全員が前傾及び後傾方向の力覚を知覚したとコメントした。

図3：肩でのハンガー反射. (左)肩のハンガー反射用デバイス, (中央)デバイスによる圧迫パターン, (右)肩ハンガー反射による後傾提示の様子

(2) 複数部位のハンガー反射を同時提示するデバイス開発

(1)で確認した部位及びすでに発見されていた適用部位に対して同時にハンガー反射を適用するデバイスを開発した(図4)。(肩のハンガー反射は最終年度に発見したため未実装)。本デバイスは従来手法と同じくエアバルーンを4個搭載したフレームから成る提示部とエアバルーンへ供給する空気を制御する制御部で構成される。提示部は頭部、肘、手首、膝への提示のために、各部位用のフレームを用意した。本デバイスの制御部は小型エアポンプ、小型エアバルブ、空気圧センサをマイコンによって制御するため、バッテリーを含む提示に必要な装置全てがバックパックに収まるサイズで実装した。数名の参加者に対して、7箇所(頭部、左右肘、左右手首、左右膝)へハンガー反射を提示したところ、各部位で力覚を知覚することが確認された(図5)。

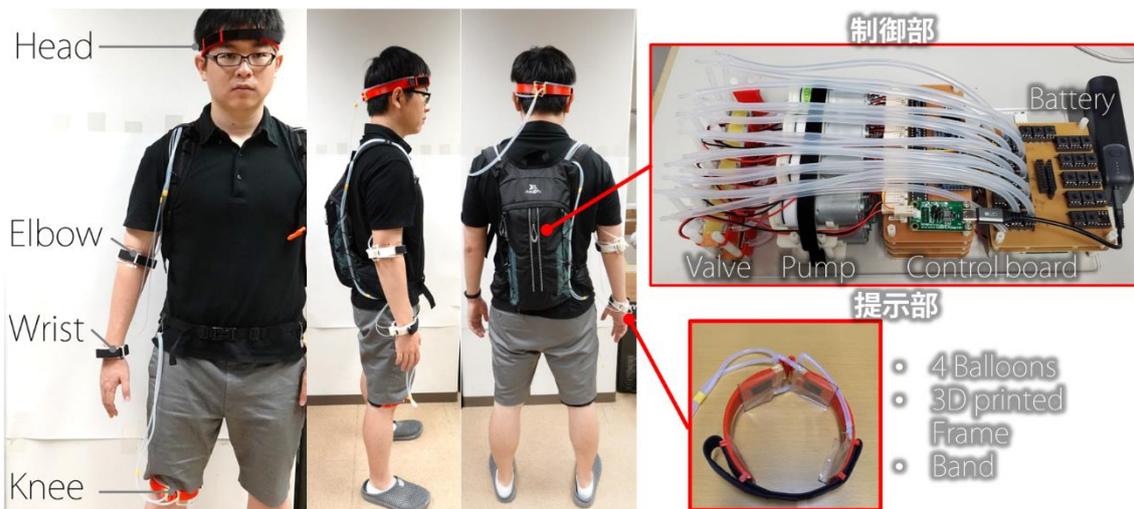


図4：複数部位のハンガー反射同時提示デバイス. (右)デバイス装着の様子, (左)バックパック内の制御部及び各部位に用意された提示部

(3) 複数部位へのハンガー反射同時提示時の使用者の知覚力覚

(2)で開発した複数箇所へのハンガー反射同時提示デバイスによって、どのように力覚を知覚するかの特性を調査した。本実験は実際にデバイスを利用する際に、同時提示によって、各部位において狙った方向への力覚知覚を確認する。実験では、実験参加者に手首及び肘の2箇所へデバイスを装着させ、回内・回外・圧迫の3条件からなる各部の組み合わせをランダムに提示し、知覚した力覚の方向条件を3択で回答させた。実験の結果、ほとんどの条件において、提示した方向と回答した方向の一致率がチャンスレートよりも有意に高かったため、2箇所へのハンガー反射は独立して力覚を知覚可能であることが確認された。



図5：複数部位へのハンガー反射同時提示の様子. (左)頭部・肘・手首・膝へのハンガー反射同時提示, (右)肘・手首への異なる方向へのハンガー反射同時提示

成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究で開発した7箇所へのハンガー反射同時提示デバイスは、従来の全身への力覚提示装置よりも軽く・小型で実装されている。また、本デバイスは力覚を提示する部位には軽量のエアバルーン4個を搭載した樹脂製のフレームを装着するのみであるため、デバイス本体を支えるための負担が小さく、使用者の動きの制限はとても小さい。本デバイスは特に上肢の回転方向の

力覚を提示するため、麻痺患者の回内・回外運動のリハビリなどへの応用が期待できる。また、頭部における異常姿勢が伴う頸部ジストニアに対して、頭部ハンガー反射適用による治療効果が確認された。ジストニアは頸部以外にも前腕や手首でも発生するため、今回開発したデバイスによる上肢への力覚提示による症状改善も期待できる。

今後の展望

本研究の3年間の計画では、当初予定していたVR体験への応用よりも、実際にデバイスを使用する際の制御及び知覚力覚に関する研究を実施した。これは、デバイスを安易に応用しても、使用者がどのように力覚を知覚するのか、などの基本的な知見がなければ、VRでのスポーツトレーニングなどへの効果的な応用は困難であると判断したためである。今後は3年間の計画で到達できなかったVRスポーツトレーニングへの応用や、運動障害や麻痺患者のリハビリ支援などへの応用を試みる。

参考文献

- [1]. H. Culbertson, et al.: WAVES: a wearable asymmetric vibration excitation system for presenting three-dimensional translation and rotation cues, CHI 2017, pp. 4972-4982, 2017.
- [2]. K. Minamizawa, et al.: Simplified design of haptic display by extending one-point kinesthetic feedback to multipoint tactile feedback, Haptics Symposium 2010, pp.257-260, 2010.
- [3]. 佐藤:触覚入力に誘発される不随意頭部回転の原理と応用, 電気通信大学 学位論文, 12612 甲第 783号, 2014

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takashi ASAHI, Takuto NAKAMURA, Michi SATO, Yuki KON, Hiroyuki KAJIMOTO, Shuji SATO	4. 巻 60
2. 論文標題 The Hanger Reflex: An Inexpensive and Non-invasive Therapeutic Modality for Dystonia and Neurological Disorders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neurologia medico-chirurgica	6. 最初と最後の頁 525-530
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2176/nmc.ra.2020-0156	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 Takashi Asahi, Takuto Nakamura, Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 442
2. 論文標題 Comment on the article “Vestibulo-ocular reflex gain changes in the hanger reflex”	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Neurological Sciences	6. 最初と最後の頁 120418 - 120418
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jns.2022.120418	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中村拓人, 小池英樹
2. 発表標題 身体複数箇所へのハンガー反射同時提示装置
3. 学会等名 第22回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(SICE SI 2021).
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村拓人, 今悠気, 梶本裕之, 小池英樹
2. 発表標題 肘ハンガー反射：肘での皮膚せん断変形による力覚知覚
3. 学会等名 SICE SI 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Gaku Fukui, Takuto Nakamura, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka
2. 発表標題 Effects of Wearing Knee-tightening Devices and Presenting Shear Forces to the Knee on Redirected Walking
3. 学会等名 Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wanhui Li, Takuto Nakamura, Jun Rekimoto
2. 発表標題 RemoconHanger: Making Head Rotation in Remote Person using the Hanger Reflex
3. 学会等名 the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李, 平城, 中村, 曆本
2. 発表標題 ハンガー反射を用いて遠隔者の頭部回旋感覚を体感する研究
3. 学会等名 インタラクシオン2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福井, 中村, 松本, 鳴海, 葛岡
2. 発表標題 膝におけるハンガー反射による歩行誘導の研究
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 中村 拓人
2. 発表標題 手首と肘でのハンガー反射同時提示時の腕計測
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Takuto Nakamura's Web https://sites.google.com/view/t-nakamura/publication Takuto Nakamura's Web https://sites.google.com/view/t-nakamura/
--

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

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
---------	---------