



前後屈方向のハンガー反射提示装置の開発と評価

中村拓人¹⁾, 葛岡英明¹⁾

Takuto NAKAMURA, and Hideaki KUZUOKA

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {n.takuto,kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: これまでの頭部におけるハンガー反射制御装置は、ヨー軸である左右方向のハンガー反射を制御する装置であった。一方で、パッシブな装置によるピッチ軸やロール軸の力覚知覚は確認されていたが、それらを制御する装置開発には至っていなかった。そこで本研究では、新たな皮膚変形提示部位を発見することで、頭部のピッチ軸である前後屈方向のハンガー反射装置を開発した。また開発した装置の力覚・運動提示性能を評価する実験を実施した。実験の結果、前屈方向には明確に力覚やピッチ軸回転運動を提示することが確認された。後屈方向においても、前屈方向には劣るものの力覚や運動を知覚することが確認された。

キーワード: ハンガー反射, 疑似力覚

1. はじめに

頭部への触覚提示技術は、VR 体験への触覚フィードバックのための装置が多く提案されている。多く提案されているのは、皮膚感覚を提示するものである。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) に皮膚変形装置 [1], 吸引機構 [2], 温度提示装置 [3] などを搭載することで、VR 体験での接触、なぞり動作、温度状況を頭部へ提示する。しかし、これらは頭部への力や運動の再現は実現していない。力や運動を提示するための技術もいくつか提案されている。ジャイロ스코ープを HMD に搭載することで抵抗感提示する手法 [4], 頸部筋肉へ電気刺激して力覚提示する手法 [5], などがある。これらは装置が高重量になってしまう課題や、電気刺激に関する安全性や痛みがあるなどの課題が残る。

こうした課題に対して、錯覚を利用することで頭部にて力覚を知覚するハンガー反射という現象がある。ハンガー反射とは、針金ハンガーを頭にかぶると、強力な力覚を知覚する錯覚現象であり、装着者は思わず頭を回してしまう [6]。本現象はハンガーから圧迫によって生まれる皮膚のせん断変形によって発生するとされている [7]。皮膚のせん断変形を提示することにより、類似の力覚知覚が頭部以外の部位 (手首, 肘, 膝など) においても確認されている [8]。本現象を力覚や運動を提示する手法として扱うために、現象を再現及び制御する研究も行われている。佐藤らは針金ハンガーを多方面から装着させた際に圧力分布と頭部回転角度を分析することによって、現象を発生させる圧迫部位を確認している [6]。発見された圧迫部位を楕円形フレーム内部に搭載した空気袋を膨らませることでハンガー反射を制御する装置も開発されている [8]。本手法は軽量・小型な装置による頭部への力覚や運動を提示する手法として期待できる。本手法は空気袋の膨らみを用いた装置であるため、装着する部分は非常に小型・軽量で実現できる。

一方で、現状で実現されている頭部ハンガー反射装置では提示可能な力や運動の方向は 1 自由度の回転方向のみである。再現可能な力覚フィードバックの種類や、VR 以外の用途拡大のためにも提示する軸や方向の増加が期待される。頭部でのハンガー反射においては、提示する圧迫によって発生する皮膚変形を変更することで、ピッチ軸やロール軸などの方向へ力覚提示が実現されている [9]。しかし、デバイスとして現象を制御するには至っていない。これは、ピッチ軸やロール軸を確認した手法では力覚を知覚することは確認できたが、安定的な装着方法や刺激方法ではなかった。具体的には楕円フレームを頭部に装着するが、フレームが安定しなかった。本課題を解決するためには、安定的に装置を装着できる状態で、ピッチ軸やロール軸へ皮膚変形を提示できる機構が必要となる。

本研究では、ピッチ軸方向のハンガー反射を提示する装置の開発と被験者実験による装置の性能評価を実施した (図 1)。本研究では HMD の装着パーツ形状を利用し、額と後頭部下部、頬と後頭部上部への圧迫刺激提示によってピッチ軸方向の皮膚せん断変形を提示する。開発した装置の性能を評価するために、被験者に装置によって提示した刺激によって知覚した力覚の方向、その回答の確信度、頭部回転角度を計測する被験者実験を実施した。

2. ピッチ軸ハンガー反射提示装置

2.1 刺激位置

ピッチ軸のハンガー反射提示では、額と後頭部に対して楕円形状のフレームを装着することで、皮膚のせん断変形を発生させていた [9]。しかし、この装着方法で意図した方向の皮膚変形を案外的に提示することは難しい。これは頭部形状の個人差やデバイスのサイズなどの調整が必要となるからである。感覚を知覚するためには、装着位置の調整を

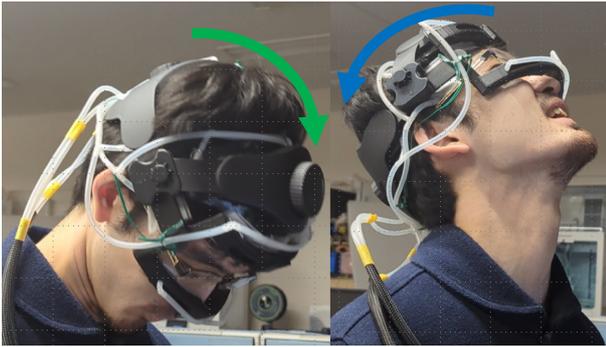


図 1: 装置による前屈と後屈回転提示

数回実施する必要があるため、現象を安定的に制御するには至っていなかった。額以外の頭部での刺激部位を検討したところ、頬が候補となった。これは、これまでのハンガー反射適用部位が骨と皮膚が近い部位であったという特徴があったためである。また、類似研究において頬へ皮膚変形提示によってヨー回転方向の力覚が知覚されたことがある [10]。そこで本研究では頬と後頭部への圧迫提示によってピッチ軸方向の皮膚せん断変形を提示する (図 2(左))。

2.2 ハードウェア

開発したピッチ軸ハンガー反射装置は、頭部フレーム、空気圧制御ユニットで構成される。頭部フレームは鼻から額までを囲うフェイスシールドパーツと、HMD 用ヘッドバンドを接続させている。頭部フレームには前後方向の皮膚変形に対応させるために、頬、額、後頭部に空気袋が配置されている (図 2(右))。配置位置は前述のようにピッチ軸方向の皮膚のせん断変形を発生させることを意図したものとなっている。空気袋は TPU フィルムを正方形に熱溶着したものである。空気圧制御ユニットは頭部フレームに配置した各空気袋へ空気を供給及び制御するユニットである。ユニットは小型ポンプ、小型ソレノイドバルブ、空気圧センサ、モータードライバ、マイコンから構成されている。マイコンがポンプ及びバルブを制御することで、シリコンチューブが接続されている各空気袋への空気供給を制御する。各空気袋は空気圧センサと接続されており、膨らませる空気圧は一定になるように制御されている。

2.3 駆動方法

本装置の駆動方法を解説する。前屈方向への提示のために、本装置は額と後頭部下部へ圧迫を加える。額への圧迫によって額から眉間方向の下方向の皮膚変形、後頭部下部への圧迫によって後頭部上部への上方向の皮膚変形をそれぞれ提示する。2つの皮膚変形の方向が前屈方向になることで、前屈方向の力覚を知覚させる (図 2 緑の刺激)。後屈方向への提示のために、本装置は頬 2 点と後頭部上部へ圧迫を加える。左右の頬 2 点への圧迫によって、頬から目の方向の上方向の皮膚変形、後頭部上部への圧迫によって後頭部の下方向への皮膚変形をそれぞれ提示する。2つの皮膚変形の方向が後屈方向になることで、後屈方向の力覚を知覚させる (図 2 青の刺激)。

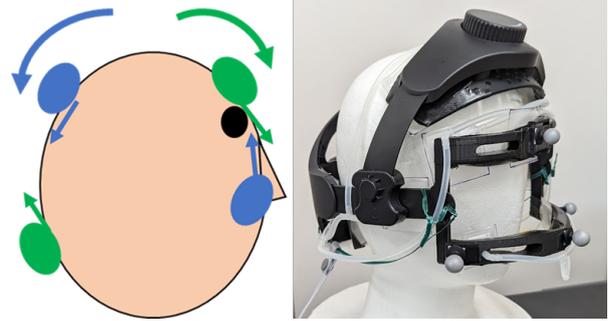


図 2: (左) 刺激位置, (右) 開発した装置

3. 装置の性能評価実験

開発した装置の力覚提示性能を評価するために、被験者実験を実施した。実験では、被験者にデバイスからの刺激によって、知覚した力覚の方向とその回答の確信度を回答させ、同時に頭部回転角度も計測する。これらにより、装置による現象再現の安定性と提示する運動の大きさを計測する。本実験は東京大学情報理工学系研究科の倫理審査委員会によって承認されたものである (ID: UT-IST-RE-230907-4)。

3.1 実験環境

実験を実施するための環境を解説する。本実験では開発した装置に加えて、データ取得のために動作計測環境と実験進行のための実験ソフトウェアを用意した。

実験ソフトウェアは、実験参加者自身がキーボードを操作することで実験を進行させ、データ取得を実施するソフトウェアである。参加者は実験者から説明を受けた後、キーボードのボタンを押して自身で実験を進行する。実験ではボタン押下で試行開始、刺激提示後に、知覚した力覚の方向を前方と後方を強制 2 択で回答し、その回答の確信度も 7 段階で回答し、送信する。回答送信もキーボードのボタン押下で実施する。回答送信後は、試行開始前状態に戻り、再びボタン押下によって試行を参加者自身で開始していく。全試行のデータは 120Hz で頭部 3 軸方向の頭部角度が記録され、試行終了時に、試行内での回転角度などを算出し csv ファイルにまとめて出力される。

頭部の角度計測は、モーションキャプチャカメラ (OptiTrack V120: Trio, OptiTrack Inc.) によって、頭部フレームに搭載したマーカーを追跡することで実施した。モーションキャプチャは PC 上のソフトウェア (Motive2.3.7, Natural Point Inc.) によって計測され、計測データはプロセス間通信によって実験ソフトウェアへ送信される。頭部角度計測のサンプリングレートは 120Hz とし、計測対象は頭部角度のピッチ軸とした。

3.2 手順

全体の実験手順は、実験に関する説明、同意書への署名、実験ソフトウェア使用方法の説明、練習セッション、計測セッション、インタビュー及びアンケート回答の流れで実施した。実験に関する説明では、本実験の目的及び手法、参加者が実際に実施するタスクについて説明した。説明内容に承諾後、同意書への署名を得た。次に、実験ソフトウェア

使用方法を説明した。これにより、参加者は自身の操作によって、試行を進行可能となる。全試行終了後、年齢などに関するアンケート調査を実施した。全タスク終了後、謝礼としてアマゾンギフトカード 2000 円分を渡して、実験を終了とした。

1 試行の流れは以下となる。まず、参加者自身がボタン押下によって試行を開始する。冒頭 2 秒間は初期姿勢計測を実施する。参加者には初期姿勢計測中はできるだけ頭部を動かさないように指示した。初期姿勢計測後、ピープ音が出力される。ピープ音出力されると、装置から刺激が 8 秒間提示される。刺激提示中は脱力し、力覚を知覚した場合は抗わずに従うように指示した。また、頭は動かしてもよいが、力に抗って無理に姿勢を初期姿勢に戻さないように指示した。刺激提示終了後、マウスを使って知覚した力覚の方向を前方・後方の強制 2 択で回答、その回答の確信度を 7 段階のリッカート尺度で回答させた。回答結果をボタン押下によって送信させた。回答結果送信後は初期状態に戻るため、参加者自身のボタン押下によって、再度試行を開始させた。

3.3 条件

本実験には研究室メンバー 14 名 (13 名男性, 平均年齢 23.8 ± 1.5) が参加した。実験では 3 種類 (前方, 後方, 圧迫) の刺激条件を用意した。圧迫条件はダミー刺激として用意し, 4 つの空気袋全てを膨らませる刺激である。圧迫刺激では皮膚変形がされるため, 力覚は生起しないはずである。試行回数は, 参加者が実験ソフトウェアになれるための練習セッションにおいて 6 試行, 計測セッションでは 1 セッションを 12 試行 (3 種類刺激 \times 4 回繰り返し) としたセッションを 3 セッション実施した。各セッションは 3 種類の刺激が同じ回数ランダムに提示された。各参加者の試行回数は 36 試行であった。実験開始から終了までに要した時間はおよそ 25 分であった。

3.4 データ

本実験では, 回答率, 確信度, 回転角度を実験データとした。回答率は本実験においては後方と回答した割合をデータとした。よって, 値が 0 に近づくと前方と回答した割合が多く, 値が 1 に近づくと後方と回答した割合が多く, 値がチャンスレートである 0.5 に近づくとどちらでもないという結果となる。また, 回答時にもし回答内容に自信がない場合は全体で偏りがないように回答させた。例えば, 方向に自信がない場合は常に前方と回答するのではなく, 交互に回答するといった意図である。確信度は知覚した力の方向を回答した際の回答内容の確信度とした。確信度は 7 段階のリッカート尺度 (1: とても自信がない, 2: 自信がない, 3: すこし自信がない, 4: どちらでもない, 5: すこし自信がある, 6: 自信がある, 7: とても自信がある。) で回答させた。基準値である 4 よりも値が大きければ自信を持って回答しており, 値が小さければ自信なく回答していることになる。回転角度は刺激提示によって回転した頭部のピッチ軸角度である。角度は刺激提示時間の最後の 1 秒間の平

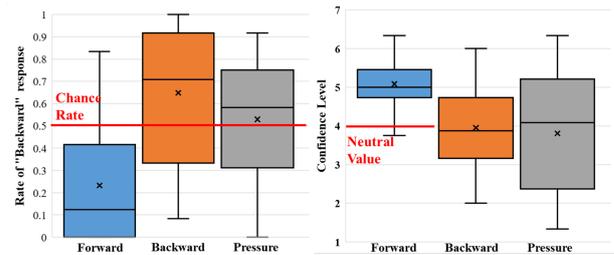


図 3: (左) 回答率の結果, (右) 確信度の結果

均頭部角度と初期姿勢の頭部角度の差分である。前屈方向が負の値, 後屈方向が正の値で表現されている。

3.5 結果

回答率の結果を図 3(左) に示す。グラフの縦軸は参加者が「後方」と回答した割合, 横軸は提示条件を表している。全条件のデータに対して 1 サンプルの Wilcoxon 符号付き順位検定 (基準値はチャンスレート 0.5) を実施したところ, 前方条件において有意差 ($p=0.008<0.01$, 効果量-0.81), 後方条件において有意傾向 ($p=0.095<0.1$, 効果量 0.514) が確認され, 圧迫条件では有意差は確認されなかった ($p=0.614>0.1$, 効果量 0.162)。

確信度に関する結果を図 3(右) に示す。グラフの縦軸は方向に関する回答時の確信度, 横軸は提示条件を表している。全条件のデータに対して 1 サンプルの Wilcoxon 符号付き順位検定 (基準値はどちらでもないの 4) を実施したところ, 前方条件において有意差 ($p=0.002<0.01$, 効果量 0.962) が確認されたが, 後方条件 ($p=0.937>0.1$, 効果量-0.039) と圧迫条件 ($p=0.727>0.1$, 効果量-0.121) では有意差は確認されなかった。

回転角度に関する結果を図 4 に示す。グラフの縦軸は刺激提示による頭部ピッチ軸回転角度, 横軸は提示条件を表している。全条件のデータに対して 1 サンプルの Wilcoxon 符号付き順位検定 (基準値は初期姿勢の 0deg.) を実施したところ, 前方条件において有意差 ($p<0.001$, 効果量-1.0), 後方条件においては有意傾向 ($p=0.058<0.1$, 効果量 0.581) が確認されたが, 圧迫条件 ($p=0.761>0.1$, 効果量-0.105) では有意差は確認されなかった。3 条件のデータに対して, フリードマン検定を実施したところ有意差が確認された ($\chi^2=15.6$, 自由度=2, $p=<0.001$)。事後検定としてダービン・コノバー法による多重比較を実施した (bonferroni 法による調整も実施) ところ, 前方と後方 ($p=<0.001$), 前方と圧迫 ($p=<0.001$) の条件間で有意差が確認され, 後方と圧迫 ($p=>0.05$) の間には有意差は確認されなかった。

3.6 考察

前方条件においては, チャンスレートより有意に高い回答率があり, 確信度も有意に高い値であったことから, 明確に力の方向が知覚されていたと考えられる。後方条件においては, チャンスレートより有意に高い回答率があったが, 確信度では有意差が確認されなかった。回答率に関しては中程度の効果量が確認された。これらより, 力の方向は明

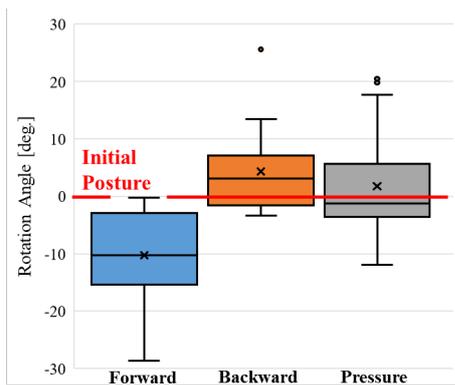


図 4: 回転角度の結果

確ではないものの、知覚されていた可能性がある。圧迫条件においては、回答率や確信度において有意差が確認されなかった。また、効果量も低い値であった。これらの結果を踏まえると、力の方向はあまり伝わっていなかった可能性がある。

回転角度に関して考察する。前方条件においては、初期姿勢より有意に大きな回転運動が発生しており、効果量も大きい値であった。これにより明確に前屈運動が発生したと考えられる。後方条件においては、有意差は確認されていないものの、中程度の効果量が確認された。これらより後屈運動が生じた可能性が示唆された。圧迫条件においては、初期姿勢との有意差も確認されず、効果量も低い値であったため、回転運動は生じなかったと考えられる。多重比較の結果、前方と後方では前方の方が大きな運動が生じたと考えられる。これは、前方方向刺激用の空気袋がうまく皮膚のせん断変形を発生させたためと考えられる。今回開発した装置の空気袋の配置は実験結果などの根拠を持って決めたものではないため、参加者の頭の形や大きさによっては後方刺激においてはうまく皮膚のせん断変形が発生していなかった可能性も考えられる。今後はより明確な頭部ピッチ軸（前後屈方向）の力覚や運動提示のためには、圧迫刺激位置の最適化の実験が必要となる。

4. おわりに

本研究では、ハンガー反射による頭部への力覚・運動提示の自由度増加のために、頭部ピッチ軸方向のハンガー反射提示装置の開発した。装置ではこれまでの額と後頭部への刺激に加えて頬を刺激位置として利用することで、安定的な刺激提示を実現した。開発した装置の力覚・運動提示性能を評価する実験を実施した。実験の結果、本装置は前屈方向においては明確に力覚や運動を提示し、後方においても力覚・運動を提示可能であることが確認された。今後は刺激提示に用いた空気袋の配置の最適化を実施することで、より明確な力覚知覚を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 23K16922 の助成及び国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP21004) の結果得られたものです。

参考文献

- [1] Chi Wang, Da-Yuan Huang, Shuo-wen Hsu, Chu-En Hou, Yeu-Luen Chiu, Ruei-Che Chang, Jo-Yu Lo, and Bing-Yu Chen. Masque: Exploring lateral skin stretch feedback on the face with head-mounted displays. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 439–451, 2019.
- [2] Takayuki Kameoka, Yuki Kon, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. Haptopus: haptic vr experience using suction mechanism embedded in head-mounted display. In *Adjunct Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 154–156, 2018.
- [3] Roshan Lalintha Peiris, Wei Peng, Zikun Chen, Liwei Chan, and Kouta Minamizawa. Thermovr: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 5452–5456, 2017.
- [4] Jan Gugenheimer, Dennis Wolf, Eythor R Eiriksson, Pattie Maes, and Enrico Rukzio. Gyrov: Simulating inertia in virtual reality using head worn flywheels. In *Proceedings of the 29th annual symposium on user interface software and technology*, pp. 227–232, 2016.
- [5] Yudai Tanaka, Jun Nishida, and Pedro Lopes. Electrical head actuation: Enabling interactive systems to directly manipulate head orientation. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [6] 佐藤未知, 松江里佳, 橋本悠希, 梶本裕之. ハンガー反射: 頭部圧迫による頭部回旋反応の条件特定と再現. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 2, pp. 295–301, 2014.
- [7] 佐藤未知. 触覚入力に誘発される不随意頭部回旋の原理と応用, 2014.
- [8] Takuto Nakamura and Hideaki Kuzuoka. Hangerbody: a haptic device using haptic illusion for multiple parts of body. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2023.
- [9] 中村拓人, 今悠気, 佐藤未知, 旭雄士, 梶本裕之. 身体全体でのハンガー反射. 第 16 回力触覚の提示と計算研究会, pp. 1–2, 2015.
- [10] Masahiro Miyakami, Akifumi Takahashi, and Hiroyuki Kajimoto. Head rotation and illusory force sensation by lateral skin stretch on the face. *Frontiers in Virtual Reality*, Vol. 3, , 2022.