



肩ハンガー反射：肩への皮膚せん断変形提示による力覚知覚

中村拓人¹⁾, 葛岡英明¹⁾

Takuto NAKAMURA, Hideaki KUZUOKA

1) 東京大学大学院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: ハンガー反射は皮膚せん断変形を提示することで力覚を知覚させる錯覚現象であり, 身体の複数部位での発生が確認されている. 本現象は上肢リハビリへの応用が期待されているが, すでに発見されている手首・肘でのハンガー反射の提示では提示力覚の自由度に制限があった. 提示力覚の自由度を増やすために新たな適用部位を発見済みの部位の特徴から考察したところ, 上肢の中では肩が候補となった. そこで本研究では, 肩への皮膚せん断変形を提示するデバイスを開発し, 肩へハンガー反射を適用した. デバイスを用いた実験の結果, 発見済みの部位と同様に提示した皮膚せん断変形の方向に力覚を知覚していることが確認された.

キーワード: ハンガー反射, 疑似力覚, 皮膚変形

1. はじめに

ハンガー反射とは針金ハンガーを頭にかぶると頭が回ってしまう錯覚現象である [1]. 本現象では, 針金ハンガーからの圧迫によって発生する頭部皮膚のせん断変形が回転方向に寄与することが知られている [2][3]. 当初本現象は頭部のみで確認されてきたが, 頭以外の楕円形状の身体部位に対して圧迫及び皮膚せん断変形を提示することで, 類似した回転方向の力覚が生起することが確認されている. すでに力覚知覚が確認されている部位として, 手首 [4], 腰 [4], 足首 [5], 膝 [6], 肘 [7] などがある. これらの部位の特徴として, 1) 楕円または圧迫によって皮膚の横ずれが発生しやすい形状である, 2) 関節などの骨と皮膚の間に脂肪や筋肉などの構成物が少ないと言った特徴がある. これらの特徴は圧迫によって皮膚のせん断変形が発生しやすい条件となっている. 1) に関しては形状が丸に近ければ, 圧迫を加えても力が対向するため横ずれは発生しにくい, また, 2) に関しては, 脂肪や筋肉が多い箇所へ圧迫を加えても, それらが沈む方向の変形のみ発生し横ずれにならないと考察できる.

このように複数部位へ力覚提示可能なハンガー反射は上肢リハビリへの応用が期待できる. 特に上肢リハビリにおいては, 腕を目標まで伸ばすリーチングタスクなどの姿勢や動きの支援が期待できる. また, 五十肩などの肩に近い部位に関する疾患でも, 腕を捻る・伸ばすなどの動きを用いたりリハビリ動作を実施する. すでにハンガー反射によって手首, 肘への力覚・運動提示は実現している [8][9]. 一方で提示可能な力覚の自由度には制限がある. 適用範囲拡大のために, 新たな適用先を上記の適用部位の特徴から考察したところ, 肩への適用が候補として考えられる. 肩においても皮膚のせん断変形提示で実現できれば, 上肢 3 箇所 (手首・肘・肩) によって提示力覚の自由度が増え, 適用動作も増えることが期待できる.

そこで本研究ではこれまで適用されてこなかった肩に対して回転方向の皮膚のせん断変形を提示し, 力覚知覚を試みる. 従来手法 [8] を参考に, フレーム内部の空気袋を膨らませることで肩に対して圧迫及び皮膚のせん断変形を提示するデバイスを開発した. 肩への皮膚のせん断変形提示による力覚知覚を確認するため, 開発したデバイスを用いた実験を実施する. 実験では, デバイスを用いて実験参加者に刺激を提示し, 知覚した力覚の方向とその確信度を回答させる.

2. 実験

本実験の目的は他の部位と同様に肩へ皮膚せん断変形を提示することで, 回転方向の力覚を知覚することを確認することである. 手法として, 肩へ前方・後方の皮膚せん断変形とダミー刺激としての圧迫を提示し, 知覚した力覚の方向を回答させた. 参加者には知覚した方向に加えて, その回答の確信度も 7 段階で回答させた.

2.1 肩ハンガー反射提示装置

本実験では肩へハンガー反射提示を行う. ハンガー反射提示装置は先行研究 [6][7] を参考に空気袋による圧迫を利用する手法の装置を用意した. 装置は肩を覆う U の字フレーム, 圧迫を担う TPU フィルム製空気袋 4 個, フレームの開放部分を閉じるベルトで構成されている. 使用者の身体に合わせるため, フレームのサイズは M(長辺 140mm 短辺 115mm 厚さ 25mm), L(長辺 150mm 短辺 130mm 厚さ 25mm) の 2 つを用意した (図 1). 使用者の肩周りが 40mm 未満の場合は M サイズ, 40mm 以上の場合は L サイズを装着させる. 空気袋の配置は膨らみの圧迫によって肩へ皮膚をせん断変形及びハンガー反射を発生させる位置となっている (図 2 左). 本実験での装置装着部位は左肩とした. 空気袋は小型ポンプ (ZR370-01PM 4.5V, ZhiRongHuaGuan)

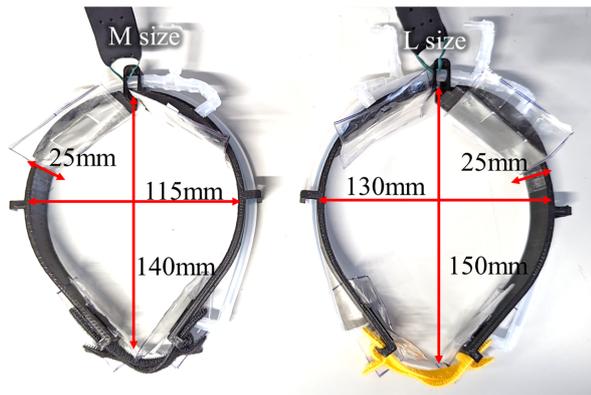


図 1: 肩ハンガー反射提示デバイス。

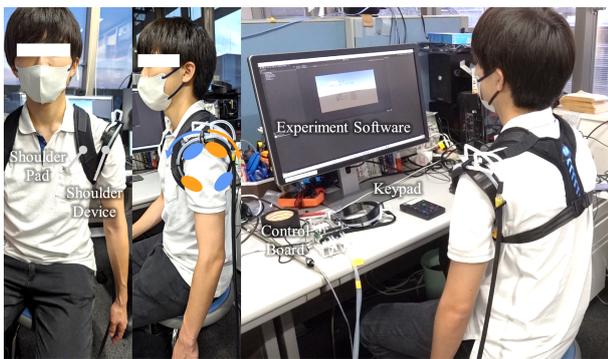


図 2: 実験設備。左: 肩ハンガー反射デバイス装着した様子及び圧迫パターン。右: 参加者を含む実験設備外観

, ソレノイドバルブ (Fa0520E 4.5V, ZhiRongHuaGuan), 空気圧センサ (MIS2503-015G, MetrodyneMicrosystem), マイコン (ESP32-DevKitC, Espressif Systems (Shanghai) Pte. Ltd.) で構成される制御部 (図 2 右) で空気供給パターンを制御する。

2.2 実験環境

本実験のために実験を進行させる実験進行ソフトウェアを用意した (図 2 右)。実験進行ソフトウェアは Unity で開発し, 参加者自身がテンキー及びマウスを用いて, 各試行の開始及び知覚した力覚方向及び確信度を入力する。実験参加者自身によって開始された試行では, 実験ソフトウェアからハンガー反射デバイスの制御部へ司令が送られ, 各条件の刺激が提示される。

2.3 実験手順

実験手順を示す。まず実験参加者に実験概要を説明し, デバイスサイズ決定のために, 服の上から肩の寸法計測を行った。肩の寸法に合う肩デバイスを装着させ, 実験ソフトウェアの操作方法及び, 回答方法を説明した。回答内容は「刺激提示によって得られた力覚の方向」と「方向の回答の確信度」の 2 つとした。力覚の方向の選択肢は「前方」と「後方」で, 自身の腹側の方向を「前方」, 自身の背中方向を「後方」と定義し, 強制回答とした。知覚した方向が全くわからない場合は実験全体で偏らないよう分散して回答するよう指示した。回答の確信度は 7 段階 (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。

実験進行ソフトウェアを用いた実験の 1 試行は以下のよう進行した。

1. テンキーに配置した開始ボタンを参加者自身が押して実験を開始する。
2. 開始後 0.5 秒間は, 待機時間とした。このとき, 参加者には脱力して手をおろさせた。
3. 待機時間を終えると, 各条件の皮膚せん断変形が 6 秒間肩へ提示される。
4. 6 秒間の刺激提示後, 参加者には実験ソフトウェアを操作して, 「肩に知覚した力覚の方向」と「方向の回答の確信度」を入力させた。

本実験では複数回の試行を連続して実施させたため, 試行回数分 1-4 を繰り返させた。8 試行を 1 セッションという区切りとし, 計測の前にソフトウェア操作や回答に慣れるための 1 セッション分の練習を実施した。練習セッションのあと, 5 セッションの計測を実施した。参加者はセッション間のタイミングで休憩を申し出ることができる。さらに, 計測の第 2 セッション終了時に強制的な 1 分間の休憩を設けた。計測終了後には, 実験に関するインタビューを実施した。インタビューでは 3 問 (Q1 「知覚した力覚はどのような感覚でしたか?」, Q2 「特に強いと感じる方向はありましたか?」, Q3 「実験に関して自由にコメントや気になった点があればお願いします」) の質問を用意し回答させた。

2.4 実験条件

本実験の参加者は 8 名の研究室メンバー (男性 8 名, 年齢 23.1 ± 0.9 歳, 肩周り 36 ± 3.7 mm (M サイズ 5 名, L サイズ 3 名)) であった。ハンガー反射デバイスから提示される刺激は, 「前方」(肩の伸展方向), 「後方」(肩の屈曲方向), 「圧迫」(空気袋すべてを駆動するが, 原理上ハンガー反射は生起しない) の 3 種類とし, 圧迫強度を弱 (空気袋内空気圧 12.4[kPa]), 中 (空気袋内空気圧 18.5[kPa]), 強 (空気袋内空気圧 24.7[kPa]) の 3 種類用意した。刺激条件は方向 3 種類と強度 3 種類の組み合わせで 9 条件用意した。実験では 9 試行 (全刺激条件 9 条件) を 1 セッションとし, 手順に記載したように, システムに慣れるための練習セッションを 1 回, 実際にデータを計測する計測セッションを 5 回実施した。1 名の被験者は合計 54 試行 (練習セッション 9 試行 + 計測セッション 9 試行 \times 5 回) を実施し, 実験時間は約 25 分であった。

2.5 結果

知覚力覚の方向の結果を図 3 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, エラーバーは標準偏差を表している。本グラフでは, 「後方」と回答した割合を示しているため, 値が 1 に近づくと「後方」とより多く回答され, 値が 0 に近づくと逆に「前方」とより多く回答され, 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。全条件において, 1 サン

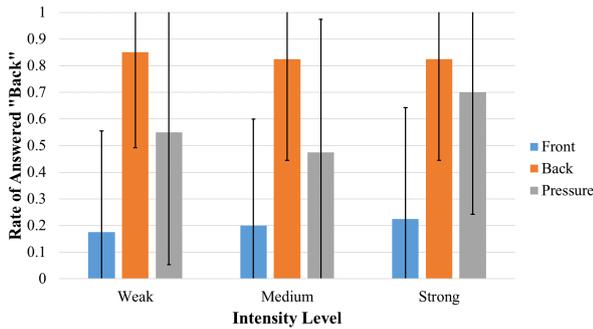


図 3: 回答した知覚力覚の方向割合。値が 1 に近づくとより「後方」と回答, 値が 0 に近づくとより「前方」と回答, チャンスレートである 0.5 に近づくとどちらでもないという回答となる。

プルの t 検定 (基準値はチャンスレートの 0.5) を行ったところ, 前方と後方の全強度条件で有意差が確認された。前方条件においては, 弱強度 ($p < 0.001$, 効果量-0.84), 中強度 ($p < 0.001$, 効果量-0.74), 強強度 ($p < 0.001$, 効果量-0.65) のように基準値よりも有意に前方の回答が多い結果となった。後方条件においては, 弱強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.97), 中強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.84), 強強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.84) のように基準値よりも有意に後方の回答が多い結果となった。また, 圧迫条件の強強度の条件において, 基準値よりも有意に後方の回答が多い結果となった ($p < 0.05$, 効果量 0.43)。圧迫条件の弱強度 ($p = 0.53$, 効果量 0.01), 中強度 ($p = 0.76$, 効果量-0.05) では有意差は確認されなかった。

回答方向の確信度の結果を図 4 に示す。グラフの縦軸は回答の確信度, 横軸は各条件, エラーバーは標準偏差を表している。回答の確信度は, 7 段階 (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) で入力されている。全条件のデータに対して Wilcoxon の符号付き順位検定 (基準値はどちらでもないの 4) を実施したところ, 前方条件の弱・中・強強度条件において, 後方条件の中・強強度条件, 圧迫条件の弱・中・強強度条件において有意差が確認された。前方条件は, 弱強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.70), 中強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.99), 強強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.89) のように基準値よりも有意に高い確信度であった。後方条件においても, 中強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.83), 強強度 ($p < 0.001$, 効果量 0.71) のように基準値よりも有意に高い確信度であった。後方条件の弱強度においては有意差は確認されなかったが, 有意傾向が確認された ($p = 0.08 < 0.1$, 効果量 0.34)。圧迫条件においては, 弱強度 ($p < 0.01$, 効果量-0.60), 中強度 ($p < 0.001$, 効果量-0.63), 強強度 ($p < 0.001$, 効果量-0.72) のように基準値よりも有意に低い確信度であった。

2.6 考察

知覚力覚の方向の結果について考察する。検定結果によると, 前方条件では有意に前方の回答が, 後方条件では有意に後方の回答が多い結果となった。このことから, 前方方向及び後方方向の皮膚せん断変形提示によって, 意図した

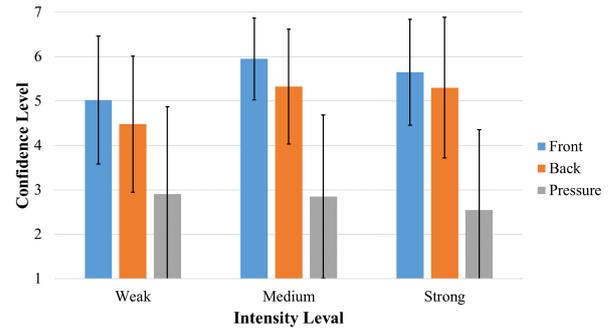


図 4: 方向回答の確信度。回答の確信度は, 7 段階 (1: とても自信がない, 2: 自信がない, 3: すこし自信がない, 4: どちらでもない, 5: すこし自信がある, 6: 自信がある, 7: とても自信がある) で入力されている。

方向への力覚を知覚させたと考えられる。一方で原理的には方向を持った力覚を知覚するはずがないダミー刺激である, 圧迫の強強度条件においても有意差が確認された。これは, デバイスの装着方法や参加者の肩の形状によって, 意図せず皮膚せん断変形が発生してしまった可能性や, 知覚した方向が不明確だったために, 回答した方向が意図せず偏ってしまった可能性がある。

回答の確信度の結果について考察する。検定結果によると, 有意差が確認された前方と後方条件では, 有意に高い確信度が確認され, 圧迫条件では有意に低い確信度が確認された。このことから, 前方と後方条件の回答は自信をもって回答され, 圧迫条件の回答は自信がなく回答されたと考えられる。

知覚方向と確信度の総合的な結果について考察する。2 つの結果を踏まえると, 前方と後方条件においては, 明確に方向を知覚し, 圧迫条件では方向知覚がとても不明確であったことが考えられる。知覚方向の結果では, 圧迫の強強度条件においても後方への回答が多いという結果となったが, 確信度の結果を踏まえると自信なく回答した結果, 偶発的に回答が偏ったと考えられる。

3. おわりに

本研究では, 身体の複数部位で確認されてきた皮膚せん断変形による力覚知覚を肩へ適用した。肩での力覚知覚を確認するために, 開発した肩デバイスによる皮膚せん断変形提示による知覚力覚の方向及び回答確信度を回答させる実験を実施した。実験の結果, 他の部位と同様に提示した皮膚せん断変形の方向に力覚を知覚していることが確認された。今後は, 知覚している力覚の物理的な強度, 力覚提示によって生起する運動量の計測, 左右の肩への同時提示による知覚調査などを実施することで, 本現象についてのより深い知見を調査する。また, 他の部位との同時使用や, 遠隔地の使用者同士のインタラクションにおける力覚フィードバックへの応用など, 統合システムへの組み込みなども合わせて実施していく。

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（JPNP21501015-0）の結果得られたものです。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Takuto Nakamura, Narihiro Nishimura, Michi Sato, and Hiroyuki Kajimoto. Application of hanger reflex to wrist and waist. In *2014 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 181–182, 2014.
- [5] 今悠気, 中村拓人, 梶本裕之. ハンガー反射の歩行への影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 4, pp. 565–573, 2016.
- [6] Hanamichi Sanada, Masato Kobayashi, Yuki Kon, and Hiroyuki Kajimoto. Investigation of effective parts for rotation and translation of the legs using hanger reflex. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference, AHs '20*, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [7] 中村拓人, 小池英樹. 肘ハンガー反射: 肘での皮膚せん断変形による力覚知覚. 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), 2021.
- [8] 中村拓人, 今悠気, 梶本裕之, 小池英樹. 身体複数箇所へのハンガー反射同時提示装置. 第 21 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 2020), 2020.
- [9] 中村拓人. 手首と肘でのハンガー反射同時提示時の腕計測. 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2022.