



肩のハンガー反射による知覚力覚の物理量計測による評価

奥田航平¹⁾, 中村拓人²⁾, 葛岡英明¹⁾

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {okudakohei, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 大阪大学 情報イノベーション機構 D3 センター

(〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32, takuto.nakamura.d3c@osaka-u.ac.jp)

概要: ハンガー反射とは、頭部に針金ハンガーを装着した際に生じる皮膚変形により、外力を受けたような力覚を知覚する現象であり、肩などの他部位においても発生が確認されている。本研究では、肩のハンガー反射により知覚する力覚の物理量を得ることを目的とし、姿勢改善支援への応用可能性を探る。肩に皮膚変形刺激を与えた後、錘による牽引で同程度の力覚を再現させ、複数の刺激条件での心理的等価量を計測した。本実験で確認された値は錯覚を介した力覚としては大きく、小型・軽量のウェアラブルデバイスで有用な力覚フィードバックを提供しうると考えられる。

キーワード: ハンガー反射, 知覚力覚, 皮膚せん断変形

1. はじめに

工場などの作業現場では、長時間にわたり不適切な姿勢の維持や繰り返しの動作を求められることが多く、これが作業関連筋骨格系障害 (Work-related Musculoskeletal Disorders, WMSDs) の主要な要因となっている [1]。

本課題に対して、これまで作業者の姿勢を改善するために様々なアプローチが提案されてきた [2][3]。多くの手法では、姿勢の異常を検知した際に警告を提示することに重点が置かれているが、警告が必ずしも適切な修正動作に繋がらず、作業者が警告を無視することがあり、修正が不十分であるという課題が存在する。また、警告が視覚や聴覚に負担をかけ、作業の集中を妨げることで効率を下げる可能性がある。このため、作業効率を維持しつつ、適切に姿勢を修正できる新しいアプローチが求められている。その 1 つとして肩部のハンガー反射に似た知覚・力覚を利用するものが挙げられる。

ハンガー反射とは、頭部に針金ハンガーを装着することで強い回転力が生じているように感じる錯覚である [4]。この現象は、針金ハンガーからの圧力によって頭部に皮膚のせん断変形が生じ、回転力の知覚へとつながることに起因している [5]。ハンガー反射と同様の力覚知覚は肩においても確認されている [6]。

細かな姿勢の修正のためには、肩ハンガー反射をユーザに提示する際の圧力とユーザが知覚する力覚の対応関係に関する個人差を解消するキャリブレーションが不可欠であるが、これについての定量的な評価はまだ行われていない。この圧力-力覚のマッピングを明らかにすることで、圧力制御パラメータを個人レベルで最適化し、過剰・不足の刺激を回避できる可能性がある。

そこで本研究では、肩ハンガー反射装置における 3 段階の圧力それぞれの下で、実験参加者が知覚する力覚を心理物

理手法によって数値化し、圧力-力覚マッピングの基礎データを取得することを目的とした。本指標は、リハビリ・姿勢支援装置への応用に向けた重要な基盤データとなる。

2. 実験

2.1 システム構成

本研究で用意した実験システムは、肩ハンガー反射装置、牽引力提示装置、および実験ソフトウェアの 3 つから構成された。

2.1.1 肩ハンガー反射装置

本研究で用いた肩ハンガー反射装置は、先行研究 [6] を参考にしている (図 1 左)。本装置は、空気袋を用いて肩に圧迫を加えて皮膚にせん断変形を生じさせることで、ハンガー反射を誘発し前傾および後傾姿勢を促す設計となっている (図 2)。使用者の身体に合わせるため、フレームとワイヤは M, L の 2 つのサイズを用意し、それぞれ同じサイズのものを同時に使用した (図 1 右)。M サイズは肩周りが 39cm 以上 49cm 以下の人に、L サイズは肩周りが 48cm 以上 58cm 以下の人にそれぞれ適用可能である。外部の空気圧ポンプをコンピュータで駆動することによって、装置の空気袋内部の圧力を 100 hPa, 200 hPa, 300 hPa の三段階の圧力条件になるように制御し、各条件下での力覚刺激を提示できる。

2.1.2 牽引力提示装置

肩ハンガー反射装置のワイヤフレームに掛けられた二本の牽引ワイヤが途中で一つに束ねられ、三脚の滑車に通っている (図 3 左)。滑車から垂れ下がる先端部に取り付けられた袋に錘を入れることで、実験参加者の肩に、錯覚ではない物理的な力覚提示を行う (図 3 右上)。袋の質量は錘の質量と比較して十分微小であり、実験条件の力覚に影響を及ぼさない程度であった。錯覚による力覚提示を行う際は、

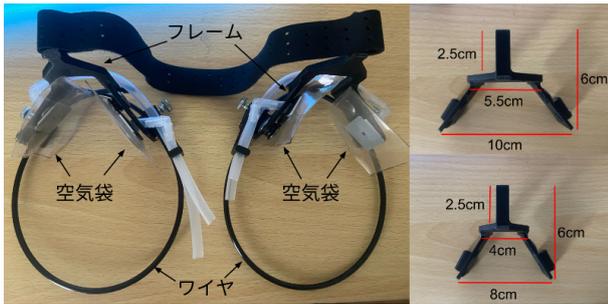


図 1: 左: 肩ハンガー反射装置. 主に, フレーム, 空気袋, ワイヤで構成されている. 右: フレーム. 上が M サイズで下が L サイズである.

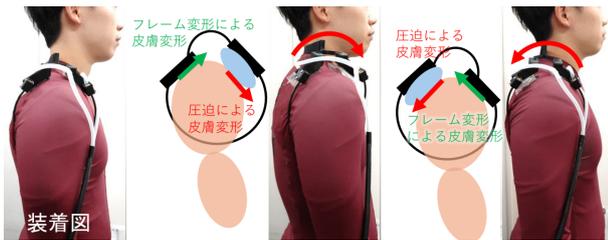


図 2: 左: 装置を装着している様子. 右: 装置の空気袋膨張パターンによる姿勢修正のメカニズム. 空気袋の膨張により肩の前後部に圧力が加わり, 皮膚変形が発生する. さらに, 弾性力を持つワイヤが変形し, 膨張した空気袋とは逆方向の接触点に回転方向の皮膚せん断変形を発生させる. これにより, 前傾 (中央図) および後傾 (右図) の姿勢修正が誘発される.

錘を持ち上げて牽引ワイヤを弛ませ, 物理的な力の知覚を避けた.

2.1.3 実験ソフトウェア

本研究では, 実験条件の設定から刺激提示, 回答の収集, データ解析までを一元的に行う専用ソフトウェアを開発した. ソフトウェアは, GUI 上で刺激方向・刺激強度・試行回数などの実験条件を設定できるインターフェースを備える. 実験中は, 設定された条件に基づいてハンガー反射刺激を自動で提示し, 実験参加者の口頭回答をボタン操作で入力できるようになっている. さらに, 各試行の回答データを階段法アルゴリズムで解析し, 実験参加者の主観的等価点を CSV 形式で出力する機能を実装した. (図 3 右下).

2.2 実験手順

2.2.1 実験説明及び準備

実験は東京大学本郷キャンパス工学部 2 号館 9 階の一室で行った. 実験参加者は入室後, 実験に関する説明を受けた上で, 実験参加同意書に署名を行った. 次に装置のサイズを決定するため, 参加者の服の上から左右の肩の寸法を計測した. 肩寸法計測では, 肩峰から脇の下を通るようにメジャーを用いて行い, 得られた値を四捨五入して計測値として記録した. 計測は薄手の服を着用した状態で行ったため, 服による影響は無視できる程度だと判断した. この計測値に基づき, 実験参加者の肩周りが 48cm 以下の場合には M サイズ, 49cm 以上の場合には L サイズの装置を, 参加者の左右それぞれの肩に装着した.

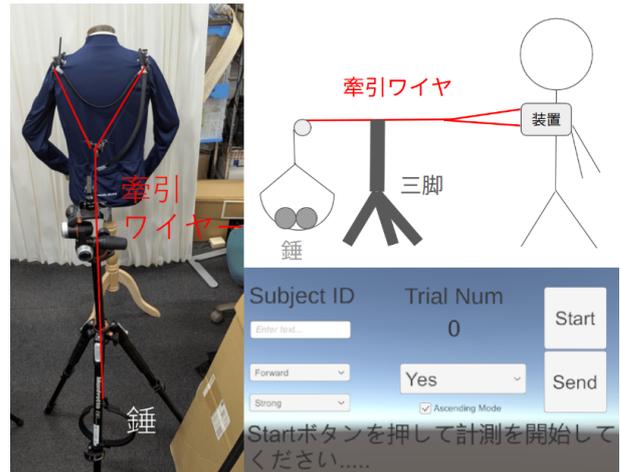


図 3: 左: 牽引力提示装置を真後ろからみた画像. 滑車から垂れ下がる先端部に取り付けられた袋に錘を入れることで, 実験参加者の肩に, 錯覚ではない物理的な力覚提示を行う. 右上: 牽引力提示装置を横から見た概略図. 右下: 実験ソフトウェア. 階段法アルゴリズムを用いて主観的等価点を CSV 形式で出力する.

2.2.2 強度比較

実験参加者は 1 試行の中で, 肩ハンガー反射装置により生起する錯覚的な力覚と, 錘による物理的な力覚の 2 回の刺激を受け, 錯覚による力覚に比べて錘による力覚が「強い」か「弱い」かを口頭で回答した. 錘の入れ替えを実験参加者が見ることによって力覚の強弱の回答にバイアスが生じることを防ぐため, 刺激提示中は目を閉じるよう実験参加者に指示した. また, 実験参加者が刺激を受けていない時 (実験参加者が目を開けている時) は錘を仕切りで隠し, 実験中に実験参加者が錘を見ることを避けた.

2.3 実験参加者

本実験には男性 14 名 (平均年齢: 24.7 ± 1.59 歳) が参加した. 各実験参加者には実験協力の謝礼として Amazon ギフト券 1,500 円分が支払われた.

2.4 実験条件

本実験において実験参加者に提示した刺激パターンは 6 種 (刺激方向 2 種 × 刺激強度 3 種の組み合わせ) であった. 方向の 2 種は, 「前方」 (肩の伸展方向), 「後方」 (肩の屈曲方向) からなる. 強度の 3 種は, 「弱」 (空気袋内空気圧 100hPa), 「中」 (空気袋内空気圧 200hPa), 「強」 (空気袋内空気圧 300hPa) からなる. 6 種の条件をどの順序で行うかはランダムに決定し, 実験参加者間でカウンターバランスをとった. 1 試行の流れは, 肩ハンガー反射装置による刺激で生起する錯覚的な力覚提示 (5 秒), インターバル (3 秒), 錯覚を生起させない錘による力覚の提示 (5 秒), 実験参加者の回答, インターバル (5 秒) であった. また, 実験参加者は 1 回目の力覚に比べて 2 回目の力覚が「強い」か「弱い」か回答し, もしもどちらとも言えない場合にはランダムに回答するよう指示を受けた. 各試行における錘の質量は階段法 [7] に倣い変化させた. ある試行で実験参加者が「強い」と回答した (錯覚による力覚よりも錘による力覚の方が強いと感じた) 場合は, 次の試行における錘の質量を減らし

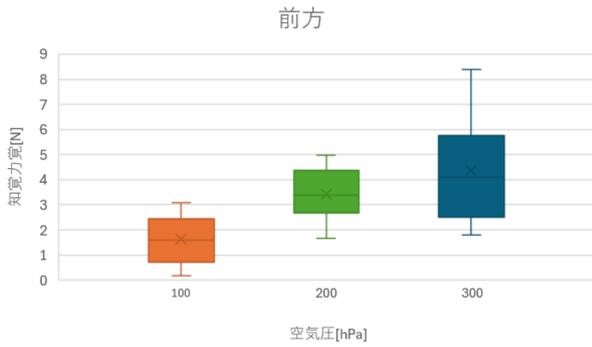


図 4: 前方条件について、各空気圧ごとに各参加者の知覚力覚の主観的等価点の平均値を集めた箱ひげ図。

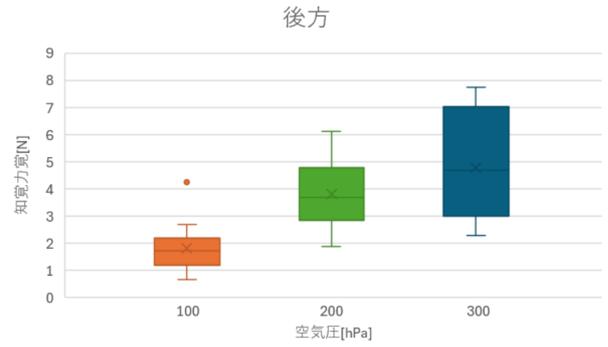


図 5: 後方条件について、各空気圧ごとに各参加者の知覚力覚の主観的等価点の平均値を集めた箱ひげ図。

た。同様に、「弱い」と回答した場合は次の試行における錘の質量を増やした。初めて回答が反転する(ある試行とその1つ前の試行で回答が「強い」から「弱い」に変わる、もしくはその逆)までは錘の質量を100gずつ変化させ、次に回答が反転するまでは錘の質量を50gずつ変化させ、その後は錘の質量を25gずつ変化させた。また、各刺激パターンにそれぞれ2つの初期値が異なる系列を用意した。1つは初期値が十分に小さい0g(錘なし)の上昇系列、1つは初期値が十分に大きい900gの下降系列である。先行研究[8]を参考に、6つの異なる系列を平行に進行させた。実験参加者は各系列をランダムな順で一試行ずつ行い、次にまた別のランダムな順で各系列を一試行ずつ行うという形で実験を進行した。本計測の前に、実験参加者は刺激や実験中の回答方法に慣れるための練習試行を行った。各刺激パターンの上昇系列及び下降系列の初期値の試行を順に1回ずつ計12試行行った。本計測では、各刺激パターンの上昇系列または下降系列を行う計14回の試行を1セットとし、1セット毎に1分間の休憩を設けながら12セット(計168試行)行った。得られたデータについての補足として、実験参加者が14番目の試行を完了した時、回答から15番目の試行の錘の質量が決まるが、15番目の試行を行ってはいない。

3. 結果

得られたデータを先行研究[8]に倣い処理し、各刺激パターンにおける参加者の主観的等価点を求めた。具体的には以下の通りであった。ある刺激パターンにおける上昇系列と下降系列のデータについて、それぞれ反転点(回答が「強い」から「弱い」、もしくはその逆になる点)の値と15番目の値の平均を求め、さらにその二つの値(上昇系列と下降系列から得られた値)の平均を求め、それを主観的等価点とした。

その結果について、各空気圧ごとに各参加者の平均値を、前方および後方条件に分けて箱ひげ図にまとめた(図4, 図5)。また、各刺激パターンで得られた平均値と標本標準偏差は表1の通りであった。

次に、刺激方向要因2水準(前方, 後方) × 刺激強度要因3水準(弱, 中, 強)の繰り返しのある二元配置分散分析を行った。有意水準は0.05とした。二元配置分散分析の

表 1: 各刺激条件における主観的等価点の平均値と標本標準偏差

条件	平均 (N)	標本標準偏差 (N)
前方弱	1.61	0.93
前方中	3.43	1.00
前方強	4.38	2.00
後方弱	1.83	0.90
後方中	3.81	1.39
後方強	4.80	1.93

結果について、刺激方向要因の主効果 ($F(1,13) = 5.55, p = 0.0349$), 刺激強度要因の主効果 ($F(2,26) = 38.75, p < 0.001$) はともに有意であったが、交互作用 ($F(2,26) = 0.12, p = 0.8870$) は有意ではなかった。強度要因に関する主効果を詳細に検討するため、階段法により算出した各被験者の主観的等価点の値(弱, 中, 強)について、被験者内対応のt検定をBonferroni法で補正してペアワイズ比較を行った。その結果、「弱」条件と「中」条件の比較では $t(13) = -9.719, p < 0.001$ (補正後 $p < 0.001$) と有意な差が認められ、「弱」条件と「強」条件の比較でも $t(13) = -8.108, p < 0.001$ (補正後 $p < 0.001$) と有意であった。一方、「中」条件と「強」条件の比較では生のp値は0.034であったものの、Bonferroni補正後のp値は0.101となり、有意水準 $p < 0.05$ を満たさなかった。これらの結果から主観的等価点について、「弱」条件とそれ以外の条件で有意に異なる一方、「中」と「強」の間では統計的に有意な差は確認されなかった。

さらに本研究のデータを用いて、ウェーバー・フェヒナー則モデル

$$S = k \log \frac{P}{P_0} \tag{1}$$

($P_0 = 100 \text{ hPa}$) と線形モデル

$$S = aP \tag{2}$$

の当てはめを比較検討した。非線形最小二乗法による対数モデルの傾き k は4.48であり、 $p=0.046$ と有意水準5%で有意で

あった。一方、線形モデルの回帰係数 a も $p=0.003$ で有意であったが、情報量基準 (AIC) では対数モデル (AIC=10.83) より線形モデル (AIC=2.77) の方が低値を示し、わずかに適合度が良好であることが示された。

4. 考察

本実験で得られた最大知覚力覚は、前方条件で約 4.4N、後方条件で約 4.8N と、錯覚を介した力覚としてはかなり大きな値であった。例えば、納藤らが牽引力錯覚と運動錯覚を組み合わせた手法では、最も強い条件下でも約 0.25N、単独の牽引力錯覚でも約 0.1N 程度の力覚しか得られなかったことが報告されている [9]。これらと比較すると、本手法は約 20 倍以上の力覚を錯覚的に生起可能であり、小型・軽量のウェアラブルデバイスで実用的な力覚フィードバックを実装しうる強力な基盤技術と言える。

本研究では、方向要因の主効果が有意であり、後方へのせん断刺激の方が前方よりも強く感じる傾向が示された。一方、方向要因と強度要因の交互作用は有意ではなかったため、強度増加に伴う PSE の上昇傾向は前後いずれの方向でも同様に認められたと解釈できる。また、強度要因の事後検定 (Bonferroni 補正付き被験者内 t 検定) では、弱条件と中条件の比較および弱条件と強条件の比較では有意差が確認されたものの、中条件と強条件の比較では有意差は確認されなかった。さらに、ウェーバー・フェヒナー則モデルの当てはめを比較検討した結果、対数モデルと線形モデルのいずれも有意であったが、線形モデルの方が対数モデルよりも適合度が高いことがわかった。これらの結果から、「刺激強度の対数関数的増加に伴う知覚量の変化」というウェーバー・フェヒナー則的な感覚飽和傾向が統計的に観測されたものの、データ点が 3 点とサンプル数が限られるため、線形近似でも説明可能であることを示唆している。より厳密なモデル選択には、圧力水準の追加設定や被験者数の増加による多点フィッティングと交差検証が今後の課題である。

5. 結論

本研究では、肩部に装着したハンガー反射装置で複数の制御圧力を提示し、階段法により得られた主観的等価点を計測した。その結果、本実験で確認された知覚力覚は錯覚を介した力覚としては大きな値であり、小型・軽量のウェアラブルデバイスで実用的な力覚フィードバックを提供しうると考えられる。また、刺激方向の違いに関しては、後方刺激のほうが前方刺激よりわずかに大きな力覚を誘発する傾向があった。さらに、圧力-力覚の関係は、対数関数モデルでも単純な線形モデルでも説明可能であったが、今回の条件下では線形近似でも良好にフィットした。これらの知見は、肩ハンガー反射を用いた力覚提示システムの制御パラメータ設計に重要な定量情報を提供する。具体的には、圧力制御パラメータと知覚力覚のマッピングを得ることで、ウェアラブル姿勢支援システムの個人別キャリブレーションが可能であること、また中高圧域では感覚飽和を考慮した制

御が必要であることを示唆している。今後は、圧力ステップの細分化や被験者数の増加により、より高精度な力覚-圧力モデルを構築し、リハビリテーションや姿勢制御支援への実装に際し、より再現性と快適性を両立するインタラクションの設計を進めていく。

謝辞 本研究は、沖電気工業株式会社および JSPS KAKENHI (Grants 23K16922) の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] Sang D. Choi and Lu Yuan and James G. Borchardt : Musculoskeletal disorders in construction: practical solutions from the literature, Professional safety, Vol. 61, No. 1, pp. 26–32, 2016.
- [2] Vignais, Nicolas and Miezal, Markus and Bleser, Gabriele and Mura, Katharina and Gorecky, Dominic and Marin, Frédéric : Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing, Applied ergonomics, Vol. 44, No. 4, pp. 566–574, 2013.
- [3] Yan, Xuzhong and Li, Heng and Li, Angus R and Zhang, Hong : Wearable IMU-based real-time motion warning system for construction workers' musculoskeletal disorders prevention, Automation in construction, Vol. 74, pp. 2–11, 2017.
- [4] Michi Sato, Rika Matsue, Yuki Hashimoto, and Hiroyuki Kajimoto : Development of a head rotation interface by using hanger reflex, RO-MAN 2009-The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 534–538, 2009.
- [5] 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, pp. 930848, 2022.
- [6] Takuto Nakamura, and Hideaki Kuzuoka : Force Perception by Presentation of Skin Shear Deformation to Shoulder, International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, pp. 278–290, 2024.
- [7] Marjorie R. Leek : Adaptive procedures in psychophysical research, Perception & psychophysics, Vol. 63, No. 8, pp. 1279–1292, 2001.
- [8] Nami Ogawa, Takuji Narumi, and Michitaka Hirose : Effect of avatar appearance on detection thresholds for remapped hand movements, IEEE transactions on visualization and computer graphics, Vol. 27, No. 7, pp. 3182–3197, 2020.
- [9] Noto, Takuya and Nakamura, Takuto and Amemiya, Tomohiro : Synergistic Illusions: Enhancing Perceptual Effects of Pseudo-Attraction Force by Kinesthetic Illusory Hand Movement, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 17, No. 4, pp. 729–741, 2024.