



手首と肘でのハンガー反射同時提示時の腕計測

中村拓人¹⁾

Takuto NAKAMURA

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, n.takuto@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: ハンガー反射は強力な力覚を生起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. 一方, 複数部位への同時提示による力知覚や運動への影響はあまり調べられていない. 将来的な動作教示での協調利用などを考慮すると, 同時提示時の特徴は必要な情報となる. よって, 本研究では手首と肘へのハンガー反射を同時提示した際の腕の動きや被験者の知覚力覚方向を調査した. 実験の結果, 両部位に同じ方向であればより大きな運動や高い正答率が確認された. 両部位が異なる方向の条件では一部条件で肘と手首が提示された方向へ運動が発生し, チャンスレートよりも有意に高い正答率が確認された. 一方で, ハンガー反射への反応の違いにより各部位の独立した運動や力知覚が確認されなかった.

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, 頭に針金ハンガーを装着す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を装着した際の圧迫によって頭部の皮膚がせん断変形することが原因とされており, 体験者は強力な力覚が生起するために思わず頭部を回転させる [2]. また, 圧迫による皮膚せん断変形を頭部以外の部位にも適用することで, 頭部以外の部位 (手首, 腰 [3], 足首 [4], 膝 [5], 肘 [6]) でも同様の力覚知覚が確認されている. 頭部での現象と頭部以外の部位での現象を同じ現象として扱うのは議論が必要だが, 本論文では提示刺激と知覚力覚の方向が一致している点から, 本論文ではこれらの皮膚せん断変形による回転方向の強力な力覚知覚をハンガー反射と呼ぶこととする.

このように身体の複数部位でハンガー反射は確認されているが, それらを同時に提示した際の知覚力覚方向や運動に関する調査はあまり行われていない. 唯一行われているのは, 頭部, 腰, 足首にハンガー反射を発生させた状態で歩行への影響調査である [4]. この研究では, ハンガー反射の発生は被験者自身が用意されたデバイスを用いて実施したが, どの程度ハンガー反射による身体運動が発生したか, 複数部位同時提示による知覚力覚の方向への影響などの調査は行っていない. これらの特性は将来的に複数部位のハンガー反射を協調利用する際に必要となる. これまでハンガー反射によって姿勢や力感覚提示のみが提示可能であったが, 複数部位のハンガー反射を協調利用することができれば, 今後は各関節を協調動作させた動作提示の実現が期待できる.

そこで本研究では, 手首と肘でのハンガー反射を同時に提示した際の各部位での知覚力覚の方向や誘発される運動計測に関する調査を行う. 実験対象を上肢にした理由は, 将

来的に上肢リハビリや遠隔作業支援への応用を想定しているからである. 実験では手首と肘へハンガー反射を同時に提示し, 被験者が知覚した力覚方向の回答及び生起された各部位の回転運動計測を行った.

2. 実験

本実験の目的は腕の複数部位へハンガー反射を同時に提示した際の特性を調査することである. 手法として, 手首と肘へハンガー反射を同時に提示した際の知覚力覚方向と生起運動の計測を用いる.

2.1 手首・肘ハンガー反射提示装置

本実験では手首及び肘へハンガー反射提示を行う. 各部位へのハンガー反射提示装置は先行研究 [5][6] 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 (図 1 左 [7]). 装置は各部位を覆う 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. 被験者の身体に合わせるため, 各部位フレームのサイズは S(肘:長辺 89.4mm 短辺 85.8, 手首:長辺 57.6mm 短辺 43.4mm), M(肘:長辺 90.7mm 短辺 89.4mm, 手首:長辺 66.7mm 短辺 48.5mm) の 2 つを用意した. 空気袋の配置は膨らみの圧迫によって各部位において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. 本実験での装置装着部位は左腕とした. 空気袋は小型ポンプ (ZR370-01PM 4.5V, ZhiRongHuaGuan), 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で空気供給パターンを制御する. 制御部は実験進行ソフトウェアと通信し, 実験進行ソフトウェアからの司令に従いハンガー反射を提示する.

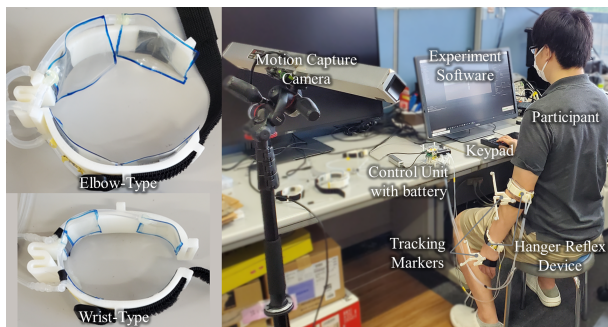


図 1: 実験設備。左: 肘及び手首ハンガー反射提示装置。右: 被験者を含む実験設備外観

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及び被験者の手首及び肘の回転運動を計測する環境を用意した。実験進行ソフトウェアは Unity で開発し、被験者がテンキー及びマウスを用いて、計測の開始及び知覚した力覚方向を回答する。回転運動の計測は実験進行ソフトウェアと連携して行われた。運動計測にはモーションキャプチャーカメラ (OptiTrack V120: Trio, OptiTrack Inc.) を用いて、被験者の手と前腕に装着させたマーカーを追跡する方法で行った。計測対象は手及び前腕の回内・回外角度とした (図 1 右)。

2.3 実験手順

実験手順を示す。まず被験者に実験概要を説明し、デバイスサイズ決定のために、手首及び肘の寸法計測を行った。次に、デバイス及びトラッキングマーカーを左腕の各部位に装着させ、デバイスによってハンガー反射に反応があるかの確認を行った。ハンガー反射に反応があることを確認されると、被験者として採用し、実験進行ソフトウェアの使用方法を説明した。実験進行ソフトウェアを用いた実験の 1 試行は以下のように進行した。

1. テンキーに配置した開始ボタンを被験者自身が押して実験を開始する。開始ボタンを押したと同時に被験者には閉眼させた。
2. 開始後 2 秒間は初期姿勢計測を行った。このとき、被験者には脱力して手をおろさせ、できるだけ腕を動かさないよう指示した。
3. 2 秒間の初期姿勢計測を終えるとビーブ音がスピーカーから出力され、各条件のハンガー反射が 5 秒間手首及び肘へ提示される。
4. 5 秒間のハンガー反射提示後、被験者には閉眼させ、実験進行ソフトウェアを操作して、手首及び力覚で知覚した力覚の方向を「圧迫」「内回転」(回内方向)「外回転」(回外方向)の 3 択で回答させた。

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。

2.4 実験条件

本実験の被験者は 9 名の研究室メンバー (男性 8 名女性 1 名、年齢 22.8 ± 0.8) であった (表 1)。ハンガー反射デバイスから提示される刺激は、各部位において「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)、「内回転」(左腕の回内方向)、「外回転」(左腕の回外方向)の 3 種類とした。刺激条件は各部位と刺激の組み合わせで 9 条件用意した (表 2)。実験では 18 試行 (全刺激条件 9 条件を 2 回繰り返す) を 1 セッションとし、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。各セッションの間には 1 分以上の休憩を設けた。1 名の被験者は合計 108 試行 (練習セッション 18 試行 + 計測セッション 18 試行 \times 5 回) を実施し、実験時間は約 45 分であった。

表 1: 被験者情報

| ID | 性別 | 年齢 | 利き手 | 手首幅 [mm] | 手首厚 [mm] | 肘幅 [mm] | 肘厚 [mm] | 手首装置サイズ | 肘装置サイズ |
|----|----|----|-----|----------|----------|---------|---------|---------|--------|
| a | 男 | 23 | 右 | 56.2 | 34.8 | 72.0 | 63.4 | m | m |
| b | 男 | 22 | 右 | 51.4 | 34.4 | 70.7 | 55.1 | m | m |
| c | 男 | 23 | 右 | 54.6 | 36.3 | 76.3 | 61.8 | m | m |
| d | 男 | 24 | 右 | 52.7 | 33.6 | 72.1 | 54.3 | m | s |
| e | 男 | 23 | 右 | 51.3 | 33.9 | 69.0 | 58.8 | m | s |
| f | 女 | 21 | 右 | 54.6 | 36.3 | 76.3 | 61.8 | m | s |
| g | 男 | 23 | 右 | 55.5 | 38.2 | 77.0 | 59.0 | m | m |
| h | 男 | 23 | 右 | 55.8 | 36.8 | 62.5 | 45.9 | m | s |
| i | 男 | 23 | 右 | 56.6 | 38.1 | 79.2 | 65.9 | m | m |

表 2: 刺激条件

| 条件番号 | 肘 | 手首 |
|------|-----|-----|
| 1 | 圧迫 | 圧迫 |
| 2 | 圧迫 | 内回転 |
| 3 | 圧迫 | 外回転 |
| 4 | 内回転 | 圧迫 |
| 5 | 内回転 | 内回転 |
| 6 | 内回転 | 外回転 |
| 7 | 外回転 | 圧迫 |
| 8 | 外回転 | 内回転 |
| 9 | 外回転 | 外回転 |

2.5 データ処理

取得したデータの処理について解説する。本実験ではデータ処理により、ハンガー反射提示時の回転角度、知覚力覚の正答率、反応時間の 3 つの値を算出する。まず、試行冒頭の 2 秒間で計測した角度の平均を初期姿勢とした。回転角度はハンガー反射を提示した 5 秒間のうち、最後の 1 秒間の平均角度と初期姿勢の差分とした。次に知覚力覚の正答率は、提示したハンガー反射の方向と被験者が回答した方向との一致した割合とした。反応時間は、ハンガー反射を提示してから各部位が 2 deg. 回転するまでに要した時間とした。なお運動が 2 deg. 以内であった試行ではデータなしとしてデータを収集した。

2.6 結果

回転角度の結果を図 2 に示す。グラフの縦軸は回転角度 (ハンガー反射提示時の最後 1 秒間の平均角度と初期姿勢の差分)、グラフの横軸は提示条件及び部位、エラーバーは標

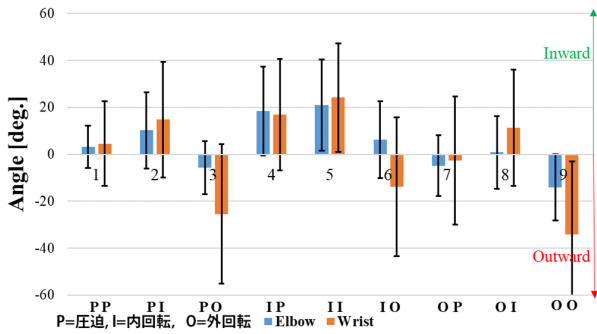


図 2: ハンガー反射による各部位の回転角度

表 3: 回転角度における条件間での多重比較結果

| Elbow | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | | * | *** | *** | *** | | *** | * | *** |
| 2 | | | *** | *** | *** | | *** | *** | *** |
| 3 | | | | *** | *** | *** | | | *** |
| 4 | | | | | *** | *** | *** | *** | *** |
| 5 | | | | | | *** | *** | *** | *** |
| 6 | | | | | | | *** | ** | *** |
| 7 | | | | | | | | | *** |
| 8 | | | | | | | | | *** |
| 9 | | | | | | | | | |

†:p<0.1 *p<0.05 **p<0.01 ***p<0.001

| Wrist | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | | * | *** | ** | *** | *** | | | *** |
| 2 | | | *** | | † | *** | *** | † | *** |
| 3 | | | | *** | *** | * | *** | *** | *** |
| 4 | | | | | *** | *** | † | *** | *** |
| 5 | | | | | | *** | *** | *** | *** |
| 6 | | | | | | | | *** | *** |
| 7 | | | | | | | | † | *** |
| 8 | | | | | | | | | *** |
| 9 | | | | | | | | | |

†:p<0.1 *p<0.05 **p<0.01 ***p<0.001

標準偏差を表している。グラフの縦軸の正値は内回転方向の角度、負値は外回転方向の角度をそれぞれ表している。全条件において、1 サンプルの t 検定 (基準値 0.0 deg.) を行ったところ、肘においては条件 8 以外の条件で有意差が確認された (条件 1,6,7: p<0.1, 条件 2,3,4,5,9: p<0.01)。手首においては条件 7 以外の条件で有意差が確認された (条件 1: p<0.5, 条件 2,3,4,5,6,8,9: p<0.01)。次に各部位内において条件間の有意差を確認するために対応のある一元配置分散分析を行い、有意差が確認された (肘: p<0.01, 手首: p<0.01)。事後検定として Bonferroni 法による多重比較を肘及び手首の条件内で行った。検定結果を表 3 に示す。

知覚力覚の正答率の結果を図 3 に示す。グラフの縦軸は提示したハンガー反射の方向と知覚し回答した方向との一致率、横軸は提示条件及び部位、エラーバーは標準偏差、赤線はチャンスレート (33.4%) をそれぞれ表している。両部位の全条件において、1 サンプルの t 検定 (基準値 33.4%) を行ったところ、肘においては全ての条件で有意差が確認された (p<0.01)。手首においては条件 7 で有意傾向 (p=0.052<0.1)、それ以外の条件では有意差が確認された (条件 4: p<0.1, 条件 1,2,3,5,6,8,9: p<0.01)。次に各部位において条件間の有意差を確認するために対応のある一元配置分散分析を行い、手首において有意差が確認された。事後検定として Bonferroni

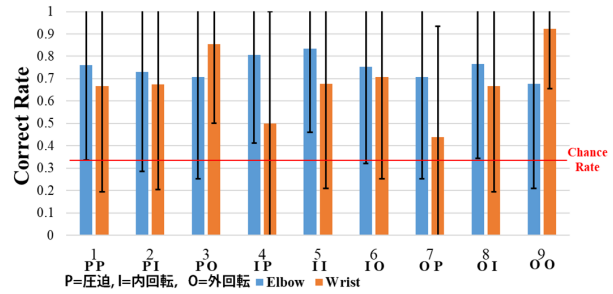


図 3: 知覚力覚の正答率

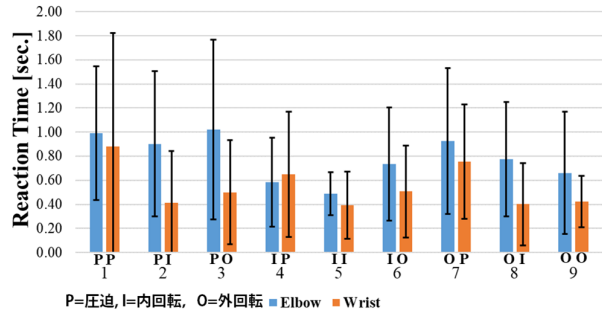


図 4: ハンガー反射への反応時間

法による多重比較を手首の条件内で行った。検定結果、条件 3 と条件 4,7 (全て p<0.01)、条件 6 と条件 7 (p<0.1)、条件 9 と条件 1,2,4,5,6,7,8 (全て p<0.1)、それぞれの間で有意差が確認された。

反応時間の結果を図 4 に示す。グラフの縦軸は反応時間、グラフの横軸は提示条件及び部位、エラーバーは標準偏差を表している。各部位において条件間の有意差を確認するために、対応のある一元配置分散分析を行い、肘及び手首において有意差が確認された。事後検定として Bonferroni 法による多重比較を肘及び手首の条件内で行った。検定結果を表 4 に示す。

2.7 考察

回転角度の結果に関して、肘においては条件 8 以外で基準値との間で有意差が確認されたことから、条件 8 以外において回転運動が生じたと考えられる。手首においても条件 7 以外で基準値との間で有意差が確認されたことから、条件 7 以外において回転運動が生じたと考えられる。片方の部位にしかハンガー反射を提示していないにも関わらず運動が生起している条件がある原因としては、提示された部位が独立して回転せず、腕全体が回転したためと考えられる。両部位が同じ方向の条件 (条件 5 と条件 9) の回転角度について考察する内回転においては両部位が内回転であった条件 5 と内回転を含む条件である条件 2, 条件 6, 条件 8 との間に有意差が確認された。ただ、条件 4 との間には有意差が確認されなかった。外回転においては、両部位が外回転であった条件 9 と外回転を含む条件である条件 6, 条件 7, 条件 8 との間に有意差が確認された。ただ、条件 3 との間には有意差は確認されなかった。このように両部位

表 4: 反応時間における条件間での多重比較結果

| Elbow | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------------------------|---|---|---|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| 1 | | | | *** | *** | * | | | ** |
| 2 | | | | ** | *** | † | | | |
| 3 | | | | ** | *** | † | | | * |
| 4 | | | | | | | * | | |
| 5 | | | | | | ** | *** | *** | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | |
| †:p<0.1 *p<0.05 **p<0.01 ***p<0.001 | | | | | | | | | |
| Wrist | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | | * | | | ** | | | ** | ** |
| 2 | | | | ** | | | ** | | |
| 3 | | | | | | | * | | |
| 4 | | | | | * | | | * | * |
| 5 | | | | | | | *** | | |
| 6 | | | | | | | † | | |
| 7 | | | | | | | | *** | *** |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | |
| †:p<0.1 *p<0.05 **p<0.01 ***p<0.001 | | | | | | | | | |

が同じ方向の条件では回転角度が大きくなる傾向が確認された。次に両部位が異なる方向の刺激提示が行われた条件 6 と条件 8 について考察する。条件 6 では肘に内方向、手首に外方向の刺激が提示され、それぞれ提示された方向の運動が生じた。一方で、条件 8 においては提示方向は反対方向であるが、肘においては運動が確認されなかった。この原因として、外方向の可動域制限が考えられ、今回の初期姿勢とした姿勢(手のひらの面が体幹側部と平行となる腕角度)が外回転に制限がある姿勢だったことが考えられる。他の原因として、手首の内回転方向に特に強く反応を示したために、腕全体として手首の回転方向に回転してしまい肘があまり回転したように計測されなかったことが考えられる。このように部位ごとに異なる方向への力覚提示を行う際は、片方を強く知覚する場合は、他の部位によって相殺される可能性もあり、使用者の各部位や方向への反応を鑑みて提示を行う必要がある。

正答率の結果に関して、手首の条件 7 以外の条件では基準値との間に有意差が確認されたことから、被験者は提示された力覚の方向を正しく認識できていたと考えられる。条件 7 において有意差が確認できなかった原因として、回転運動が生起していなかったことが考えられる。本実験では圧迫の有無でハンガー反射が提示されているかを悟られないために、本来は運動が生起しないと考えた圧迫条件を加えた。結果的に圧迫を加えていないために、肘は運動していたが手首が独立して運動しなかったために回答が難しかった可能性がある。類似の条件として肘は内方向、手首は圧迫を加えた条件 4 の正答率はチャンスレートとの間に有意差はあるものの他の値と比較して低い値となっている。このように力覚を提示する対象としていない部位に圧迫刺激を加えると、力覚へのノイズとなってしまい使用者を混乱させてしまう可能性があるため、圧迫刺激との同時使用は避ける必要がある。

反応時間の結果に関して、検定結果によると両部位が同じ方向の条件である条件 5 と条件 9 が総合的に早い反応で

あり、運動があまり生起しないと想定された条件 1 が両部位の反応が遅いということが確認された。また、肘の反応時間が全体的に手首よりも遅い理由として、装置に使用した空気袋の大きさがことなり、圧迫提示までの時間がより長かったことが考えられる。反応時間計測の条件統制として、今後改善する必要がある点であると考えられる。

3. おわりに

本研究では腕の複数部位に対して同時にハンガー反射を提示した際の特性調査を目的に、肘と手首でハンガー反射を同時提示し、知覚力覚方向や回転運動の計測を行った。実験の結果、両部位に同じ方向であればより大きな運動や高い正答率が確認された。一方で両部位で異なる方向のハンガー反射を提示したところ、一部の条件では肘及び手首の独立した運動や力覚が確認されたが、肘の運動が確認されない条件も確認された。原因として、部位や方向などの条件(本実験では肘の外回転と手首の内回転)によるハンガー反射への反応の違いの影響が考えられる。今後は複数部位へ提示するタイミングをずらした条件による運動や力覚知覚への影響などの調査を行い、本現象を応用する際の注意点や特徴の解明に努める。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20K19844 の助成を受けたものです。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.