腰部ハンガー反射発生時の圧力分布の計測

○今 悠気（電気通信大学），中村 拓人（電気通信大学，日本学術振興会），
梶本 裕之（電気通信大学）

Measurement of the pressure distribution under the Hanger Reflex of the Waist

○Yuki KON (UEC), Takuto NAKAMURA (UEC, JSPS Research Fellow),
and Hiroyuki KAJIMOTO (UEC)

Abstract: The Hanger Reflex is a phenomenon in which the head involuntarily rotates when force is applied via a wire hanger placed on the head. This phenomenon has been found in other body parts such as the wrist, waist, and ankle, and four translation. In this paper, we measured of the pressure distribution under the Hanger Reflex of the waist.

1. はじめに

ハンガー反射は針金ハンガーを頭に被ると意図せず頭が回ってしまう現象である．本現象は皮膚の２点圧迫により発生し[1]，皮膚変形の向きがハンガー反射の運動の向きに寄与していることが報告されている[2]．また，ハンガー反射は皮膚変形の向きを工夫することで Yaw 軸への回旋運動のみだけではなく，Pitch 軸や Roll 軸への回旋運動の生起や前後左右への並進運動の生起が報告されている[3]．また，頭部以外にも手首，腰部，足首にて類似の現象が確認されている[4]．

我々はこれまでハンガー反射を歩行ナビゲーションへと応用することを目的として，ハンガー反射の発生が確認されている頭部・腰部・足首でのハンガー反射の歩行への影響を調査してきた[5]．調査の結果，腰部ハンガー反射が最も効率的に歩行に影響を与えていることを確認し，空気圧アクチュエータを用いた腰部ハンガー反射制御デバイスを製作，回旋力と並進力の再現を確認した[6]．しかし，これまで腰部ハンガー反射の発生条件に関する調査は行われておらず，より効率的にハンガー反射を発生させるデバイスを制作するためにはハンガー反射の発生条件である圧迫と皮膚変形に関して調査を行っていく必要がある．

本稿では Yaw 軸への回旋と前後左右への並進のハンガー反射をより効率的に発生させることを目的として，ハンガー反射の発生条件の一つである圧迫に関して，Yaw 軸を中心とした回旋方向と前後左右並進方向のハンガー反射発生時の圧力分布を計測した．

2. 腰部ハンガー反射

2.1 腰部ハンガー反射デバイス

本実験で用いる腰部ハンガー反射デバイスはバネ性のあるステンレスフラットバー（SUS304-CSP H 材）を用いたデバイスである．本デバイスは厚さ 1.5mm，幅 4.5cm，長さ 1.0m のステンレスフラットバーを U 字に湾曲させ，両端をベルクロで繋ぐことでサイズ調整可能なデバイスとなっている．また，デバイスの内側には身体への過度な圧迫を防ぐためクッション材としてメスのベルクロを貼付している（図 1 左上）．

2.2 Yaw 軸を中心とした回旋方向のハンガー反射

Yaw 軸を中心とした回旋方向のハンガー反射を提示する場合は，腰部ハンガー反射デバイスを装着した後，デバイスを左右に回しずらすことで対抗する２点に圧迫を提示し，デバイスの弾性による復元力によってせん断方向の皮膚変形が生じ，これが Yaw 軸を中心とした回旋方向のハンガー反射を生起させる（図 1）．

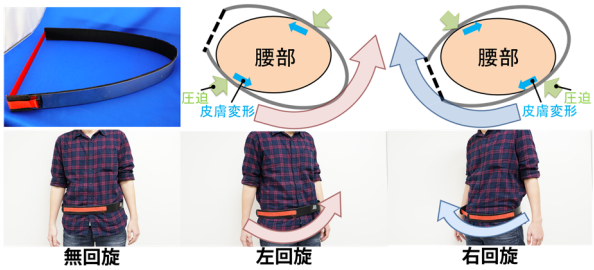

図 1 腰部ハンガー反射による回旋力提示の様子

2.3 並進方向のハンガー反射

並進方向のハンガー反射を提示する場合は，腰部ハンガー反射デバイス内側に接触子を配置し，デバイスを身体に押し込むように装着することで腰部の片側に２点圧迫を提示する．デバイスの弾性による復元力によって並進方向の皮膚変形が生じ，これが並進方向のハンガー反射を生起させる（図 2）．

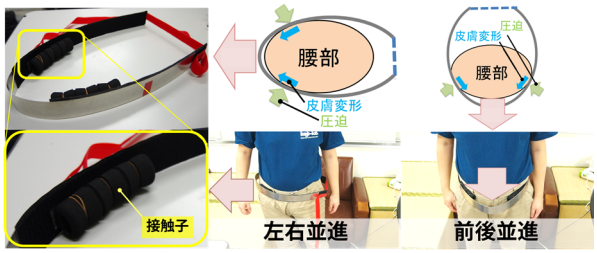

図 2 腰部ハンガー反射による並進力提示の様子

3. 計測システム概要

これまで頭部と手首のハンガー反射発生時の圧力分布は計測されてきた[1] [7]．佐藤ら[1] の頭部圧力分布の計測手法を採用し，腰部の圧力分布を次のように計測した．

(1) 腰部を一周するアレイ状感圧センサを用いて，腰部圧力分布を得る．

(2) 被験者の胸部の角度と位置を得る．

本実験で用いた圧力分布計測システムを図 3に示した．フィルム状感圧センサ（SFE-SEN-09376，Interlink Electronics 社）をアレイ状に 22 個配置したベルト型の圧力分布計測デバイスを作成した．感圧センサは横幅が 43.7mm である．しかし，圧力分布計測デバイスをそのまま腰部に巻きつけるとフィルム状感圧センサが反り返り，センサが反応してしまう．これを防ぐために感圧センサの裏面に 38.1mm×38.1mm の大きさの 2mm 厚アクリルを貼付することで感圧センサが反り返ることを防止した．また，腰部ハンガー反射デバイスが圧力分布計測デバイスに対して滑らないように 2mm 厚のアクリルの表面に 38.1mm×38.1mm の大きさの 3mm 厚天然ゴムスポンジ（M14-3100M，株式会社イノアックコーポレーション）を貼り付けた．また，アレイ状に配置した感圧センサ間は約 2.5mm の間が空いている．圧力分布計測デバイスの全長は 1015mm である．

胸部角度と位置は被験者の胸部に再帰性反射材マーカーを装着し，それを光学式モーションキャプチャーシステム（Optitrack Prime13, Natural Point,Inc）を用いて計測した．胸部角度と位置の取得と同時に圧力分布データも取得した．

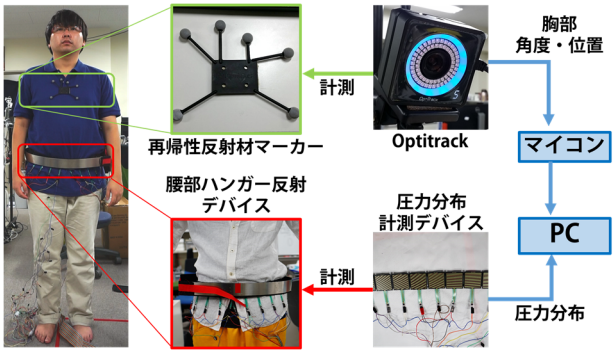

図 3 腰部圧力分布計測システム

4. 実験１：回旋時圧力分布計測

4.1 実験概要

ハンガー反射誘発デバイスを用いて腰部回旋時の圧力分布を計測する実験を行った．圧力分布を計測するために感圧センサをアレイ状に並べた圧力分布計測デバイスを腰に装着し，光学式モーションキャプチャーシステム（Optitrack Prime13, Natural Point,Inc）を用いて胸部の角度と位置を計測した．

4.2 実験条件・手続き

被験者は男性 6 名であった．実験開始前に被験者全員が Yaw 軸を中心とした回旋方向の腰部ハンガー反射が発生することを確認している．被験者の腰部に圧力分布計測デバイスとハンガー反射誘発デバイスを装着し，立位状態で行った．感圧センサはへその下にセンサ番号 1 番の感圧センサが位置するように装着した．圧力分布計測デバイスに使用するセンサ数は本来被験者の腰回りの長さによって変化するはずであるが，今回の実験では全被験者の腰回りの長さがほぼ同じだったため全被験者で圧力センサ２１個の圧力分布を得た．

計測はキャリブレーション計測と本計測を 1 セットとしており，キャリブレーション計測では腰部ハンガーデバイスを装着せず，圧力分布計測デバイスのみを装着した状態で圧力分布と胸部の角度と位置を計測した．また，本計測では腰部ハンガーデバイスと圧力分布計測デバイスを両方装着し，圧力分布と胸部の角度と位置を計測した．

腰部ハンガーデバイスは被験者の腰部に横から装着し，センサ 1 つ分ずつ回し，圧力分布計測と身体計測を行った．計測はデバイスが腰部を半周するまで行った．

実験中，被験者には閉眼するように指示し，力あるいは運動を知覚した場合は抗わずに自然でいるように指示をした．

4.3 実験結果

佐藤ら[1] の解析手法を参考に，得られたデータに対して次のような処理を行った．

① 本計測で得られた圧力と胸部の角度の値からキャリブレーション計測で得られた圧力と胸部の角度の値を引いた．

② ①で得られた圧力センサの値に①で得られた胸部の Yaw 軸方向の回旋角度をかけることで重み付けを行った．また，この時に左回旋・右回旋のデータの振り分けを行った．

③ ②で得られた値を加算し，正規化した．

④ ①～③を全被験者について行った．

⑤ ④で得られた全被験者のデータを加算し，正規化した．

⑥　左回旋・右回旋に寄与した値をそれぞれレーダーチャートで表示した．

処理によって得られたグラフを図 4 に示した．図 4 は左回旋・右回旋に関するグラフである．グラフの円周の数字はセンサの番号を示しており，半径は回旋方向のハンガー反射への寄与の度合いを示している．寄与が大きいほど大きな値となる．また，寄与が大きい順番に上から 4 つのセンサ番号を丸で囲った．

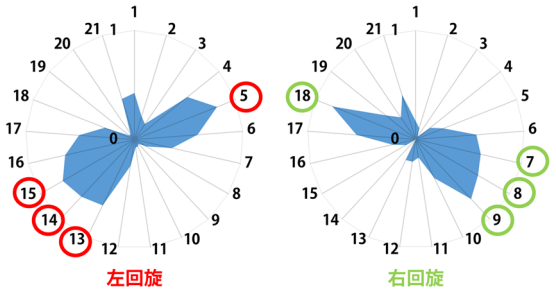

図 4 左：左回旋時の腰部圧力分布
右：右回旋時の腰部圧力分布

図 4 より，センサ 5，13，14，15 の位置の圧迫が左回旋方向のハンガー反射に寄与しており，センサ 7，8，9，18 の位置の圧迫が右回旋方向のハンガー反射に寄与していることが確認できる．

5.　実験 2 ：並進時圧力分布計測

5.1 実験概要

ハンガー反射誘発デバイスを用いて腰部並進時の圧力分布を計測する実験を行った．実験 1 と同様のセットアップを用いた．

5.2 実験手続き・条件

被験者は男性 4 名であった．実験開始前に被験者全員が並進方向の腰部ハンガー反射が発生することを確認している．腰部ハンガー反射デバイスは，センサ 1 つ分ずつ回し，圧力分布計測と身体計測を行った．計測はデバイスが腰部を 1 周するまで行った．圧力分布計測デバイスに使用するセンサ数は本来被験者の腰回りの長さによって変化するはずであるが，今回の実験では全被験者の腰回りの長さがほぼ同じだったため全被験者で圧力センサ 2 0 個の圧力分布を得た．

なお，効率的に並進方向のハンガー反射を提示するためには，腰部ハンガー反射デバイスに接触子を取り付けることで身体片側に明確に圧迫を提示可能であることは分かっている（図 2）が，今回の実験では接触子は用いていない．

5.3 実験結果

佐藤ら[1] の解析手法を参考に，得られたデータに対して次のような処理を行った．

①　本計測で得られた圧力と胸部の位置の値からキャリブレーション計測で得られた圧力と胸部の位置の値を引いた．

②　①で得られた圧力センサの値に①で得られた胸部の x 軸（前後方向）と z 軸（左右方向）の値をかけることで重み付けを行った．また，この時に前並進・後並進・左並進・右並進のデータの振り分けを行った．

③　②で得られた値を加算し，正規化した．

④　①～③を全被験者について行った．

⑤　④で得られた全被験者のデータを加算し，正規化した．

⑥　前並進・後並進・左並進・右並進に寄与した値をそれぞれレーダーチャートで表示した．

処理によって得られたグラフを図 5 と図 6 に示した．図 5 は前並進・後並進，図 6 は右並進・左並進に関するグラフである．グラフの円周の数字はセンサの番号を示しており，半径は並進方向のハンガー反射への寄与の度合いを示している．寄与が大きいほど大きな値となる．また，寄与が大きい順番に上から 4 つのセンサ番号を丸で囲った．

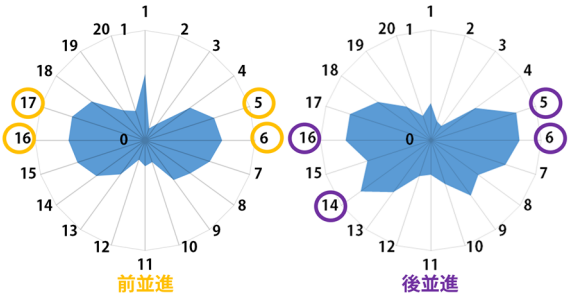

図 5 左：前並進時の腰部圧力分布
右：後並進時の腰部圧力分布

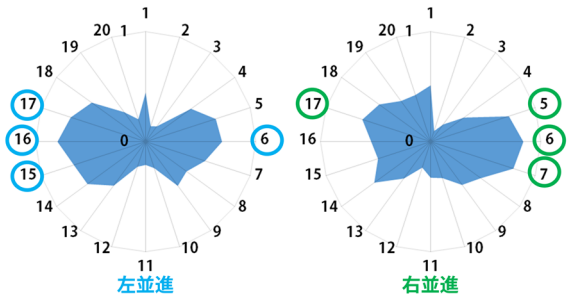

図 6 左：左並進時の腰部圧力分布
右：右並進時の腰部圧力分布

図 5 より，センサ 5，6，16，17 の位置の圧迫が前並進方向のハンガー反射に寄与しており，センサ 5，6，14，16 の位置の圧迫が後並進方向のハンガー反射に寄与していることが確認できる．また，図 6 より，センサ 6，15，16，17 の位置の圧迫が左並進方向の

ハンガー反射に寄与しており，センサ 5，6，7，17 の位置の圧迫が右並進方向のハンガー反射に寄与していることが確認できる．

6. 考察

6.1 Yaw 軸を中心とした回旋方向のハンガー反射

図 4 より，腰部における Yaw 軸を中心とした回旋方向のハンガー反射は，頭部と手首における回旋方向のハンガー反射の圧力分布と同様の傾向を示した．すなわち左回旋方向のハンガー反射は身体右側面前方と身体左側面後方を圧迫することで生起し，右回旋方向のハンガー反射は身体左側前方と身体右側後方を圧迫することで生起することが確認された．

また，頭部ハンガー反射においてハンガー反射によって頭部が回旋する向きは皮膚変形の向きが寄与していることが報告されている[2]．今回，頭部ハンガー反射と同様の圧力分布が腰部で得られたことから，腰部ハンガー反射発生時に腰部においても皮膚変形が生じており，かつその回旋方向は生じた皮膚変形の向きが寄与していることが予想される．

今後は腰部ハンガー反射発生時の腰部の皮膚変形に関して調査を行っていくことで，腰部ハンガー反射が頭部ハンガー反射と同一の現象であることを確認できると考えている．

6.2 並進方向のハンガー反射

図 5，図 6 より並進方向のハンガー反射は力の生起する方向の身体面を，生起する力の向きとは反対方向に圧迫することで生起することが示された．しかし，例えば左並進方向のハンガー反射に関して考えてみると，これは身体を左から右に圧迫するので，左から右への力を感じているはずであり，それによって左方向に運動が生起することは不自然であり，被験者の多くが右から左への力を感じたとコメントしている．本実験では被験者に「力あるいは運動を知覚した場合は抗わずに自然でいる」ように指示をしているため，身体を左から右に圧迫した場合は左から右への力を知覚し力と釣り合うために右方向へ運動する，あるいは力は知覚しなかったが右方向へ運動するはずであり，これは被験者のコメントと一致しない．

ここでハンガー反射について再考すると，ハンガー反射は身体への圧迫により生起し，少なくとも回旋のハンガー反射に関しては皮膚変形の向きが運動の向きに寄与することが判明している．このハンガー反射の機序を左並進方向のハンガー反射に当てはめると，図 5 で確認された身体左側への圧迫によりハンガー反射が発生し，結果として左並進方向の運動が生起しているということは，おそらく左並進方向への皮膚変形が生じていると考えられる．

以上により，並進方向のハンガー反射は身体を圧迫することで生起するが，その運動の方向は皮膚変形の向きが寄与していることが示唆された．今回は皮膚の横ずれ量に関しての計測を行っていないため，今後は横ずれ方向と並進方向のハンガー反射の方向が一致しているかどうかを確認する必要がある．

今後は，今回計測できなかった皮膚変形に関して定性的，定量的な調査を行っていくことで回旋方向と並進方向の腰部ハンガー反射をより効率的に発生させることが可能になると考えている．

6.3 腰部ハンガー反射制御デバイス

我々はこれまで腰部ハンガー反射を制御するデバイスとして，幅約 10cm の空気圧アクチュエータを４つ配置することで回旋方向と並進方向のハンガー反射を再現するデバイスを提案してきた[6]．本デバイスにより，回旋方向と並進方向のハンガー反射の再現に成功したものの，装着者によっては回旋方向と並進方向のハンガー反射を同時に生起させることができず，空気圧アクチュエータの位置を少し調整する必要もあった．本実験で得られた結果より，幅 4.5cm の空気圧アクチュエータを用いることでハンガー反射を効率的に発生させる圧迫点を圧迫可能であることが示唆された．また，回旋方向と並進方向のハンガー反射を同一セットアップで確実に生起させるためには空気圧アクチュエータの数は４個では少ないことが示唆された．

今後は本実験で得られた結果を元に腰部ハンガー反射制御デバイスの改良を行っていく必要があると考えている．

7. おわりに

本稿では，これまで腰部におけるハンガー反射で確認されていた Yaw 軸を中心とした回旋運動と前後左右への並進運動発生時の圧力分布を計測し，腰部ハンガー反射を効率的に発生させる圧迫点を調査した．実験の結果，Yaw 軸を中心とした回旋運動に関して，従来頭部と手首のハンガー反射で確認されていた，身体右側面前方と身体左側面後方のような対抗する２点が腰部でのハンガー反射においても効率的に発生させる圧迫点であることが確認された．また，前後左右への並進運動に関しては，力の生起する方向の身体面を，生起する力の向きとは反対方向に圧迫することで生起することが確認された．今後は，今回調査できなかった皮膚変形に関して調査していくとともに，より効率的にハンガー反射を生起可能なハンガー反射制御デバイスの製作を行い，本研究の目的である実世界と VR 世界の歩行ナビゲーションへの応用を行っていく．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K12079 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, 中村拓人, 梶本裕之: ハンガー反射における皮膚せん断変形による触錯覚と運動誘発, 第 5 回テレイグジスタンス研究会, 2014.

[3] 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, 2015.

[4] T. Nakamura , T. Nishimura , M. Sato , H. Kajimoto: Application of Hanger Reflex to wrist and waist. IEEE VR 2014, 2014.

[5] Y. Kon, T. Nakamura, M. Sato, H. Kajimoto: Effect of Hanger Reflex on Walking , IEEE Haptics Symposium 2016, April 8-11, 2016.

[6] 今悠気, 中村拓人, 梶本裕之:ハンガー反射を用いた腰部への回旋・並進力提示デバイス, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2016.

[7] T. Nakamura , N. Nishimura , M. Sato , H. Kajimoto: Development of Wrist-Twisting Haptic Display Using the Hanger Reflex, ACE 2014, 2014.