

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11187

研究課題名(和文) 足底への動的皮膚刺激による姿勢制御への介入効果の研究

研究課題名(英文) Effect of moving tactile stimuli to sole on postural control

研究代表者

平岡 浩一 (Hiraoka, Koichi)

大阪公立大学・大学院リハビリテーション学研究科 ・教授

研究者番号：10321209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：立位における足底への動的触覚刺激が姿勢動揺制御におよぼす影響を検証した。歩行様の動的触覚刺激では、その刺激の移動に一致した左右方向のリズミカルな足圧中心の偏位が観察された。この現象は単に動的刺激を左右に移動させた場合も生じたことから、左右方向の足底への動的触覚刺激は、位相依存的な左右方向身体動揺を誘発すると結論した。歩行開始前に左右方向に動的触覚刺激を与えると、歩行開始時の予測的姿勢制御が弱化した。step timeも動的触覚刺激により延長したことから、予測的姿勢制御の弱体化は動的触覚刺激による歩行開始動作の速度低下に起因すると考えた。動的触覚刺激は立位身体動揺を誘発する手段として有用である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

立位における足底への動的触覚刺激による姿勢制御変調の知見はこれまで見当たらない。今回得られた姿勢制御を変調させる動的触覚刺激パターンの発見は、立位姿勢制御障害に対する理学療法技術の向上に寄与すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The effects of moving tactile stimuli to the sole in the standing position on the control of postural sway were examined. During the moving tactile stimuli to the sole, rhythmic deviation of the center of pressure in the medial-lateral axis in accordance with the movement phase of the tactile stimuli was observed. Since this phenomenon also occurred when the tactile stimuli were simply moved laterally, we concluded that the moving tactile stimuli to the sole in the medial-lateral axis induce the phase-dependent body sway in the medial-lateral axis in quiet stance. The moving tactile stimuli given before gait initiation weakened anticipatory postural adjustment before gait initiation, and prolonged the step time, suggesting that this weakening of predictive postural control was caused by the slowing of the gait initiation. Taken together, these results suggest that moving tactile stimuli to the sole is a useful tool for inducing the medial-lateral body sway in quiet stance.

研究分野：運動制御

キーワード：動的触覚刺激 立位 姿勢制御 側圧中心

## 1. 研究開始当初の背景

姿勢制御障害に対する有効な介入手段は確立されていない。下腿三頭筋への振動刺激による伸張が関節運動覚に錯覚をもたらし、立位足圧中心が変位することが知られている<sup>1)</sup>。同じく体性感覚である足底触覚を情報源にした姿勢制御調整もよく知られている<sup>2-4)</sup>。申請者は健常者の立位において足底挿板を挿入し、ヒラメ筋H反射の抑制が生じることを確認した<sup>5)</sup>。これらより、足底触覚刺激により立位姿勢制御を変調できる可能性がある。

接近歩行音を振動刺激に変換して踵部に提示すると身体近傍空間の拡張が生じる<sup>6)</sup>。この知見は足底触覚を通して中枢神経の活動に働きかけることができる可能性を示唆している。ところで、姿勢制御を伴った抗重力肢位動作では足底触覚が移動する。立ち上がり動作では荷重の前方移動と後方への揺り返しが連続して生起される。足底に歩行時の歩行では荷重による触覚入力と消失が左右交互に繰り返され、かつ荷重側の足底では前方に触覚分布が移動する。これらの動作で生じる動的触覚を人工的に再現できれば、その動作に関連する神経機構の賦活を介して立位姿勢制御を変調させ、その介入を姿勢制御障害に応用できる可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、立位姿勢制御を変調させる足底への動的触覚刺激パターンを発見することを主な目的とする。この目的を達成するため、1)動的触覚刺激パターンを実現する装置の製作、2)動的触覚刺激パターンと姿勢制御変調の関係性の検証を行った。

## 3. 研究の方法

歩行は姿勢制御が寄与する動作である。したがって、動的触覚刺激により歩行に関与する神経機構を駆動できれば姿勢制御を変調させることができると予想した。歩行において立脚相は周期の60%を占め、その立脚相では足底への荷重は後方から前方へ移動する。したがって、足底触覚は立脚期の60%で生じ、かつその触覚分布は後方から前方へ移動する。そこで実験1では、歩行を模した足底への動的触覚刺激として、片側足底に1周期の60%の時間で後方から前方への動的触覚刺激を導入し、これを左右交互に繰り返した。両脚支持期を模した、両側への動的触覚刺激を周期の20%に導入した。この刺激を導入する前、刺激中、刺激後における足圧中心(COP)を観察した。実験2では、前後・左右に動的触覚刺激をリズムカルに移動させ、その時のCOPを観察した。実験3では15秒間リズムカルな左右方向への動的触覚刺激の移動を実施し、その刺激中に歩行開始させ、左右方向への動的触覚刺激の歩行開始時予測的姿勢制御およびステップ動作への影響を観察した。

## 4. 研究成果

### (実験1)

移動触覚刺激の際、被験者全員が歩行をしている様な錯覚を感じなかった。COPx移動距離とCOPy移動距離において、主効果(視覚・期間・刺激条件)の有意な交互作用は見られなかった。COPx移動距離( $F_{2,28} = 1.418, p = 0.259$ )、COPy移動距離( $F_{2,28} = 1.951, p = 0.161$ )には期間の有意な主効果は見られなかった。COPx移動距離( $F_{1,14} = 0.073, p = 0.791$ )、COPy移動距離( $F_{2,28} = 0.481, p = 0.500$ )に対する刺激の有意な

主効果はなかった。COPx 移動距離 ( $F_{1,14} = 8.106, p = 0.013$ )、COPy 移動距離 ( $F_{1,14} = 13.934, p = 0.002$ ) とともに視覚の主効果が有意であった。VO (視覚遮断時) の COP 移動距離は、NVO (非視覚遮断時) のそれよりも有意に大きかった。

COPx の z スコアに対する主効果間の有意な交互作用は見られなかった。刺激 ( $F_{1,14} = 3.625, p = 0.078$ )、期間 ( $F_{2,28} = 0.951, p = 0.399$ ) の有意な主効果はなかった。視覚の主効果は有意であった ( $F_{1,14} = 9.305, p < 0.05$ )。COPx は視覚閉塞で右方向に偏位した。COPy の z スコアは、刺激 ( $F_{1,14} = 0.704, p = 0.416$ )、期間 ( $F_{2,28} = 0.837, p = 0.444$ ) の有意な主効果はなく、主効果の有意な交互作用 ( $F_{2,28} = 1.847, p = 0.176$ ) も見られなかった。視覚と刺激との間には有意な交互作用があった ( $F_{1,14} = 10.467, p < 0.05$ )。単純主効果の検定により、VO では刺激を与えた COPy の方が刺激を与えない場合よりも有意に前方にあった ( $p < 0.05$ )。単純主効果の検定、刺激試行では VO の COPy が NVO の COPy より有意に前方であった ( $p < 0.05$ )。

刺激試行の刺激期間における COPx に対する位相と視覚の影響を検定する二元配置の ANOVA では、主効果間の有意な交互作用は認められなかった ( $F_{0.34, 2.79} = 2.328, 0.145$ )。視覚の主効果は有意ではなかったが ( $F_{1,14} = 0.096, 0.762$ )、位相のそれは有意だった ( $F_{1,72, 24.10} = 5.162, p = 0.017$ )。ボンフェローニ検定により、位相 1 の COPx は位相 4~7 より有意に右寄り、位相 2 のは位相 5~6 より有意に右寄り、位相 10 のは位相 6 より有意に右寄りであった ( $p < 0.05$ )。COPy に関する主効果間の有意な交互作用は見られなかった ( $F_{1,44, 20.15} = 1.152, p = 0.319$ )。位相の主効果は有意ではなかった ( $F_{1,44, 20.09} = 0.546, p = 0.530$ )。視覚の主効果は有意であった ( $F_{1,14} = 13.597, p = 0.002$ )。COPy は、VO で前方に位置した。

## (実験 2)

COPx 移動距離において、視覚 [ $F(1,14) = 5.7606, p = 0.0309$ ] に有意な主効果があったが、位相 [ $F(2,28) = 2.7865, p = 0.0788$ ] や刺激 [ $F(1,14) = 0.1193, p = 0.7349$ ] に有意な主効果は見られなかった。視覚と位相の間には有意な交互作用があった [ $F(2,28) = 3.4336, p = 0.0464$ ]。単純主効果の検定の結果、刺激後期間において視覚の主効果が有意であった [ $F(1,40) = 12.299, p = 0.0011$ ]。多重比較検定の結果、視覚閉塞条件における COP 変位 ( $2410.505 \pm 94.339\text{mm}$ ) は、視覚閉塞なし ( $2535 \pm 98\text{mm}$ ;  $p < 0.001$ ) よりも刺激後で有意に小さいことが明らかにされた。単純主効果の検定により、視覚的閉塞条件では期間の主効果が有意であった [ $F(2,56) = 4.0093, p = 0.0236$ ]。多重比較検定の結果、視覚的閉塞条件において、刺激後の COP 変位 ( $2410.505 \pm 94.33\text{mm}$ ) は、刺激前 ( $2467.109 \pm 101.769\text{mm}$ ;  $p = 0.0421$ ) または介入期間 ( $2498.726 \pm 94.198\text{mm}$ ;  $p < 0.001$ ) に比べ有意に小さかった。

COPy 変位では、視覚 [ $F(1,14) = 5.8870, p = 0.0293$ ] に有意な主効果があったが、位相 [ $F(2,28) = 2.8826, p = 0.0727$ ] や刺激 [ $F(1,14) = 0.0126, p = 0.9122$ ] に有意な主効果はなかった。視覚と位相の間には有意な交互作用があった [ $F(2,28) = 5.1742, p = 0.0122$ ]。単純主効果の検定の結果、刺激後位相において視覚の主効果が有意であった [ $F(1,39) = 15.4792, p = 0.0003$ ]。多重比較検定の結果、刺激後の COPy 変位は、視覚閉塞あり ( $2443.099 \pm 97.823\text{mm}$ ) が視覚閉塞なし ( $2591.782 \pm 104.230\text{mm}$ ;  $p < 0.001$ ) より有意に小さかった。視覚的閉塞条件では、位相の単純主効果が有意に認められた [ $F(2,56) = 3.7515, p = 0.0296$ ]。多重比較検定の結果、視覚的閉塞条件では、刺激後段

階の COPy ( 2443.099 ± 97.823mm ) は介入段階の COPy ( 2532.866 ± 95.573mm ; p < 0.001 ) より有意に小さかった。視覚的閉塞感のない条件では、相の主効果が有意に認められた [ F ( 2,56 ) = 4.4105, p = 0.0166 ] . 多重比較検定の結果、視覚的閉塞感なし条件では、刺激前段階の COPy ( 2498.511 ± 106.740mm ) は、刺激後段階 ( 2591.782 ± 104.230mm、p=0.0005 ) または介入刺激段階 ( 2571.454 ± 105.518mm、p=0.0085 ) に比べて有意に小さくなった。

COPx における視覚 [ F ( 1,14 ) = 2.0782, p = 0.1714 ] 位相 [ F ( 1.4219, 19.9060 ) = 0.2759, p = 0.6864 ] 刺激 [ F ( 1,14 ) = 0.4437, p = 0.5162 ] には、有意な主効果はなかった。視覚、位相、刺激の間には有意な交互作用はなかった ( 視覚対位相 [ F ( 2,28 ) = 0.6183, p = 0.5461 ], 刺激対視覚 [ F ( 1,14 ) = 2.6017, p = 0.1291 ], 刺激対位相 [ F ( 1.4122, 19.7713 ) = 2.2446, p = 0.1435 ], 刺激対位相 対位相 [ F ( 2,28 ) = 0.0121, p = 0.9850 ] ) 。 COPy ポジションにおける視覚 [ F ( 1,14 ) = 3.6875, p = 0.0754 ] 位相 [ F ( 2,28 ) = 2.7825, p = 0.0790 ] および刺激 [ F ( 1,14 ) = 0.5000, p = 0.4911 ] について有意な主効果はなかった。視覚、位相、刺激の間には有意な交互作用はなかった ( 視覚対位相 [ F ( 2,28 ) = 3.3263, p = 0.0506 ] 刺激対視覚 [ F ( 1,14 ) = 0.1625, p = 0.6929 ] 刺激対位相 [ F ( 2,28 ) = 1.3690, p = 0.2709 ] 刺激対位相對位相 [ F ( 2,28 ) = 0.1181, p = 0.8890 ] ) 。

視覚的閉塞感なし条件では位相 [ F ( 3.4990, 48.9864 ) = 0.5633, p = 0.6679 ] に有意な主効果はなかったが、視覚的閉塞感あり条件では [ F ( 4.4766, 62.672 ) = 3.3588, p = 0.0119 ] に有意な主効果がみられた。多重比較検定の結果、位相 2 の COPx ( 0.635 ± 0.283 ) は位相 8 ( -0.647 ± 0.254, p = 0.0195 ) または位相 7 ( -0.753 ± 0.211, p = 0.0059 ) より左方向に大きく偏倚していることが分かった。同様に、位相 3 ( 0.454 ± 0.189 ) は位相 7 ( -0.753 ± 0.211 ; p = 0.0439 ) よりも左方向に大きくずれており、位相 4 ( 0.541 ± 0.176 ) は位相 7 ( -0.753 ± 0.211 ; p = 0.0172 ) よりも左方向に大きくずれていたことがわかった。

COPy の位相については、視覚遮断条件 [ F ( 3.5826, 50.1562 ) = 0.2240, p = 0.9080 ] 視覚遮断なし条件 [ F ( 3.2348, 45.2873 ) = 0.3288, p = 0.8189 ] とともに有意な主効果は見られなかった。COPx の変位には、位相 [ F ( 2,28 ) = 4.4696, p = 0.0207 ] に有意な主効果があったが、刺激 [ F ( 1,14 ) = 1.6381, p = 0.2214 ] と視覚 [ F ( 1,14 ) = 2.9430, p = 0.1083 ] に有意な主効果はみられなかった。刺激と視覚の間には有意な交互作用があった [ F ( 1,14 ) = 5.0039, p = 0.0421 ] 単純主効果の検定では、刺激の主効果に対して視覚の閉塞が有意であった [ F ( 1,22 ) = 4.9731, p = 0.0363 ] 多重比較検定の結果、コントロール条件における COPx 変位 ( 2442.742 ± 74.675mm ) は、視覚的閉塞条件における刺激条件 ( 2515.180 ± 82.901mm ; p = 0.0046 ) より有意に小さかった。単純主効果の検定では、コントロール条件は視覚の主効果に対して有意であった [ F ( 1,23 ) = 6.920, p = 0.0149 ] . 多重比較検定の結果、コントロール条件では、視覚遮断条件での COPx 変位 ( 2442.742 ± 74.675mm ) が視覚遮断なし条件での COPx 変位 ( 2524.980 ± 81.669mm ; p = 0.0011 ) より有意に小さかった。刺激と位相、視覚との間には有意な交互作用があった [ F ( 2,28 ) = 3.7256, p = 0.0368 ] 単純主効果の検定では、刺激の主効果に対して介入相が有意であった [ F ( 1,33 ) = 4.2354, p = 0.0476 ] 多重比較検定の結果、介入期において、コントロール条件の COPx 変位 ( 2502.360 ± 99.750mm ) は、刺激条件 ( 2578.335 ± 101.693mm ; p < 0.0011 ) より有意に小さかった。単純主効果の検定では、刺激条件が相の主効果として有意であることが明らかになった [ F ( 2,56 ) = 5.5284, p = 0.0064 ] . 多重比較検定の

結果，刺激条件では，介入期（ $2578.335 \pm 101.693\text{mm}$ ； $p < 0.001$ ）よりも刺激前後期の COPx 変位（ $2488.118 \pm 103.801\text{mm}$ ， $2492.990 \pm 107.046\text{mm}$ ）が有意に小さかった。COPy の変位には、位相 [  $F(2,28) = 3.7346$ ， $p = 0.0365$  ] に有意な主効果があったが、刺激 [  $F(1,14) = 1.5048$ ， $p = 0.2402$  ] と視覚 [  $F(1,14) = 3.48211$ ， $p = 0.0832$  ] に有意な主効果はなかった。視覚、位相、刺激の間に有意な交互作用は見られなかった。

### (実験3)

前後軸の予測的姿勢制御(APA)の振幅は、刺激条件では  $11.5 \pm 1.8\text{mm}$ 、非刺激条件では  $13.5 \pm 1.5\text{mm}$  であった。刺激条件における APA の振幅は、非刺激条件における振幅よりも有意に小さかった ( $p = 0.047$ )。内側-外側軸の APA の振幅は、刺激条件では  $18.2 \pm 1.8\text{mm}$  であり、非刺激条件では  $20.5 \pm 1.9\text{mm}$  であった。刺激条件における APA の振幅は、非刺激条件における振幅よりも有意に小さかった ( $p = 0.030$ )。前後軸の step time は、刺激条件では  $1258 \pm 41\text{ms}$ 、非刺激条件では  $1226 \pm 34\text{ms}$  であった。刺激条件では、非刺激条件よりも時間が長かった ( $p = 0.033$ )。内側-外側軸のステップ時間は、刺激条件では  $1296 \pm 36\text{ms}$  であり、非刺激条件では  $1265 \pm 33\text{ms}$  であった。刺激条件での時間は非刺激条件での時間より長かった ( $p = 0.048$ )。左足から歩行開始する確率は、刺激条件では  $0.007 \pm 0.007$  であり、非刺激条件では  $0.004 \pm 0.004$  であった。また、左足から歩行する確率は、刺激条件と非刺激条件とで有意な差はなかった ( $p = 0.690$ )。APA 開始の開始合図からの時間は、刺激ありの試行（前後軸  $8079 \pm 483\text{ms}$ 、側方軸  $8112 \pm 485\text{ms}$ ）と刺激なしの試行（前後軸  $8431 \pm 514\text{ms}$ 、側方軸  $8467 \pm 514\text{ms}$ ）の間に有意差はなかった [ 前後軸  $p = 0.24$ ，側方軸  $p = 0.25$  ]。

### 参考文献

- 1) Hayashi, R., Miyake, A., Jijiwa, H., & Watanabe, S. (1981). Postural readjustment to body sway induced by vibration in man. *Experimental Brain Research*, 43(2), 217-225
- 2) Roll, R., Kavounoudias, A., & Roll, J. P. (2002). Cutaneous afferents from human plantar sole contribute to body posture awareness. *Neuroreport*, 13(15), 1957-1961
- 3) Meyer, P. F., Oddsson, L. I., & De Luca, C. J. (2004). The role of plantar cutaneous sensation in unperturbed stance. *Experimental Brain Research*, 156(4), 505-512
- 4) Simoneau, G. G., Ulbrecht, J. S., Derr, J. A., & Cavanagh, P. R. (1995). Role of somatosensory input in the control of human posture. *Gait & Posture*, 3(3), 115-122
- 5) Hiraoka, K. (2003). Placement of a plate under the forefoot in stance: decreasing the excitability of the soleus motoneuron pool. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 82(11), 837-841
- 6) 雨宮智浩, 池井寧, 広田光一, 北崎充晃, (2016). 歩行を模擬した足底振動刺激による身体近傍空間の拡張", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 21(4), 627-633.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 澤口靖、川寄拓、平岡 浩一
2. 発表標題 歩行を模した足底動的触覚刺激による静的立位姿勢動揺への影響
3. 学会等名 日本臨床神経生理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國村洋志、小田仁志、川寄拓、辻中椋、濱田直輝、福田志保、松岡雅一、平岡 浩一
2. 発表標題 歩行開始前立位時足底への動的触覚刺激が予測的姿勢制御に与える影響
3. 学会等名 日本臨床神経生理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川寄 拓、澤口 靖、平岡 浩一
2. 発表標題 足底への動的触覚刺激による立位姿勢変化
3. 学会等名 日本臨床神経生理学会大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------