

卒業論文要旨

支持面一定周波数揺動に基づく前庭リハビリテーションの開発

Development of vestibular rehabilitation method using horizontal sway of the support surface at a constant frequency

システム工学群

動的デザイン研究室 1250132 濱崎 凌

1 緒言

人間の立位のバランスを維持するためには、前庭感覚・体性感覚・視覚の感覚器統合によって姿勢を検知する必要がある。一方、各感覚器の重みづけは環境によって変化し、個人差もあると考えられている。例えば、高齢者や慢性めまい患者では、視覚に重みづけが集中し、バランス力の低下やめまいの励起が生じる。これらの感覚器の重みづけを調整するトレーニング方法として、前庭リハビリテーションやノイズ前庭電気刺激 (nGVS) が提案されているが、確立されていない。

感覚器の重みづけを変えるための一つの方法として、立位における支持面を前後に正弦波で揺らす一定周波数揺動がある。揺動のテンポである周波数を変化させると、0.4Hz 付近を境界として低周波数帯域では重心制御戦略が優位、高周波数帯域では頭部加速度を抑制する戦略が優位となり⁽¹⁾、前者では体性感覚、後者では前庭感覚への重みづけの増大が考えられる。したがって、0.4 Hz 以上の一定周波数揺動によって、前庭感覚のリハビリテーションへの介入が可能である。

本研究の目的は、支持面一定周波数揺動に基づく前庭リハビリテーション手法の開発である。健康者を対象として、0.6 Hz の一定周波数揺動を行い、前庭感覚への重みづけ遷移の効果を検証する。検証方法は、フォースプレートと頭部の慣性センサ (IMU) を組み合わせた重心推定手法を活用したバランス評価法を用いる。前庭に重みづけが遷移すると、頭部加速度が抑制されるとともに、主に矢状面の重心加速度が抑制されることを想定した。

2 一定周波数揺動による前庭感覚の重みづけ効果の検証

2.1 実験概要

本実験では、0.6 Hz の一定周波数揺動の介入の前後に 40 秒間の安静立位計測を行い、介入の効果を調べる。図 1 に実験の概略図を示す。前庭への効果を調べるために、介入、評価とも閉眼を主と位置づけ、介入前の安静立位は開眼、閉眼の順、一定周波数揺動による介入は閉眼で実施し、介入後の安静立位は閉眼、開眼の順で実施した。

被験者として、若年健康者 14 名程度を対象とした。安静立位の評価では、被験者はフォースプレート (コムバランス、テック技販) に立ち、慣性センサ (IMS-WD、テック技販) を後頭部に装着した。一定周波数揺動による介入は、揺動実験機 (BASYS、テック技販) で行い、装置上のフォースプレート (TF-3040、テック技販) と後頭部の慣性センサ (IMS-WD) で介入中の動作を計測した。介入は周波数 0.6Hz で振幅 16mm の前後方向の支持面水平揺動を 205 秒間行った。

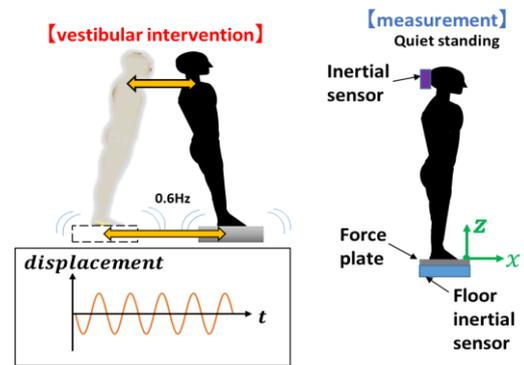


Fig. 1 Schematic diagram of the intervention and balance evaluation

解析のために、静止座標系 $O-xyz$ を定義した。x 軸は水平前方、y 軸は水平左手方向、z は鉛直上向きを正とする。重心変位を添え字 b 、頭部変位を添え字 h で示す。

2.2 評価方法

介入の前後における安静立位のデータに基づいてバランス評価を行い、介入の効果を検証する。計測データから、二重倒立振り子モデルをベースとする以下の式を解くことで、重心 (COM) 変位、COM 加速度、頭部加速度、下半身の重心加速度、上半身の重心加速度を高い精度で推定できる⁽²⁾。

$$\begin{bmatrix} 0.322M & 0.656M & 0 \\ 0.0155MH & 0.512MH & -9.59M \\ -2.05 & 2.27 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_x(t) \\ -N_y(t) \\ \ddot{x}_h(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0.352M & 0.626M & 0 \\ 0.0253MH & 0.495MH & -9.59M \\ -2.01 & 2.27 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_x(t) \\ -N_y(t) \\ \ddot{x}_h(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式は矢状面を対象としたもので、式(1)は被験者が男性の場合、式(2)は女性の場合の推定式であり、 \ddot{x}_1 と \ddot{x}_2 はそれぞれ下半身と上半身の COM 加速度 (m/s^2)、 x_b は身体の COM 変位、 \ddot{x}_h は頭部加速度である。 R_x は矢状面水平床反力 (N)、 N_y は y 軸まわりの床反力モーメント (Nm)、 H は身長 (m)、 M は体重 (kg) である。

さらに、得られた下半身と上半身の COM 加速度から、以下の式によって関節戦略の貢献を推定できる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_{x1}(t) \\ \ddot{\xi}_{x2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00917 & 1.37 \\ -2.06 & 0.903 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_{x1}(t) \\ \ddot{\xi}_{x2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0343 & 1.36 \\ -2.04 & 0.910 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、式(3)は被験者が男性の場合、式(4)は女性の場合の変換式である。 $\ddot{\xi}_{x1}$ は足関節戦略に起因する頭部加速度 (m/s^2)、 $\ddot{\xi}_{x2}$ は股関節戦略に起因する頭部加速度 (m/s^2) である。

本研究では得られた変数から表 1 に示すバランス評価指標に基づいてバランスの変化を評価する⁽³⁾。このバランス評価指標では、添え字 AP が前後方向、ML が左右方向の特性を表す。バランス評価指標は 3 種類に大別され、1 つ目は揺れの大きさに関する評価指標で、RMSCM が COM 変位の二乗平均平方根 (RMS)、RMSCMA が COM 加速度の RMS、S95CM が COM 変位の 95%信頼楕円面積、RMSHA が頭部水平加速度の RMS、AVGHA が頭部平均加速度である。2 つ目は、COM 制御に関する評価指標で、GRAD が COM 変位を横軸、COM 加速度を縦軸とした分布に対する近似直線の傾き、SIG は同近似直線を基準とした COM 加速度の標準偏差、CC は COM 変位と COM 加速度の相関係数である。3 つ目は頭部加速度制御に関する評価指標で、RMSX11 は足関節戦略によって生じた頭部加速度の RMS、RMSX12 は股関節戦略によって生じた頭部加速度の RMS、RXI は両者の比 ($RMSX12/RMSX11$)、CXI は両者の相関係数を表す。

これらの指標に基づいて、介入前後の変化に対し、t 検定によって統計的有意差の生じる評価指標を調査した。

3 結果

本報告では前庭感覚の重みづけが大きい閉眼の場合の一定周波数揺動による介入前後の評価について報告する。図 2 に閉眼における頭部平均加速度 (AVGHA)、95%信頼楕円面積 (S95CM)、矢状面の COM 変位と COM 加速度の相関係数 (CC_{AP}) について、14 名の被験者における介入前 (青) と介入後 (赤) の平均と標準偏差を示す。最も効果が期待された頭部加速度の抑制を表す AVGHA については介入前後で有意差がみられず、結果を割愛するが COM 加速度の抑制もみられなかった。S95CM は介入後に有意に増大し ($p = 0.043$)、 CC_{AP} は介入後に相関が小さくなった ($p = 0.008$)。

上記の結果について考察すると、0.6 Hz の一定周波数揺動によって、体性感覚から前庭感覚への感覚器重みづけの遷移が生じたと考えられる。しかし、安静立位においては、元々頭部加速度抑制のための重みづけは最適化されているので、AVGHA に介入前後で有意な違いは生じなかったと解釈できる。一方、介入によって体性感覚の重みづけが減少すると、安静立位で COM 制御に関する指標が悪化した可能性が示唆された。すなわち、介入後の S95CM が増大するとともに、COM 制御の正確さを表す CC_{AP} (通常は負の相関になる) の値が上昇し、COM 変位と COM 加速度の相関が減少した。

以上の結果より、0.6 Hz の一定周波数揺動による介入によって感覚器重みづけが体性感覚から前庭感覚に遷移することを期待したが、介入前後の閉眼時の安静立位では、頭部加速度の抑制については大きな変化はなく、COM 制御の悪化することがわかった。

4 結言

本研究では、0.6 Hz の支持面の一定周波数揺動による介入が健常者のバランスにおよぼす影響を調査した。閉眼安静立位のバランス評価では、介入後に頭部加速度の抑制効果はみられなかったが、重心動揺面積が増大し、COM 変位の摂動に対し正確な力制御ができなくなっていることが示唆された。この結果より、少なくとも体性感覚の重みづけは減少し

Table 1 Balance evaluation indices in quiet standing

Index	unit	description
Sway index for COM and head acceleration		
RMSCM _{AP}	mm	Root mean square of COM displacement on each plane
RMSCM _{ML}		
RMSCMA _{AP}	mm/s ²	Root mean square of COM acceleration on each plane
RMSCMA _{ML}		
S95CM	mm ²	95% confidence ellipse area of COM
RMSHA _{AP}	mm/s ²	Root mean square of head acceleration on each plane
RMSHA _{ML}		
AVGHA	mm/s ²	Mean head acceleration
Index for COM control		
GRAD _{AP}	-	The gradient of linear approximation between COM displacement on each plane
GRAD _{ML}		
SIG _{AP}	mm/s ²	The standard deviation of COM acceleration from linear approximation on each plane
SIG _{ML}		
CC _{AP}	-	The correlation coefficient between COM displacement and acceleration on each plane
CC _{ML}		
Index for head acceleration control		
RMSX11 _{AP}	mm/s ²	Root mean square of head acceleration caused by ankle strategy on each plane
RMSX11 _{ML}		
RMSX12 _{AP}	mm/s ²	Root mean square of head acceleration caused by hip strategy on each plane
RMSX12 _{ML}		
RXI _{AP}	-	RXI _{AP} = RMSX12 _{AP} /RMSX11 _{AP}
RXI _{ML}		
CXI _{AP}	-	Correlation coefficient of head acceleration caused by the two joint strategies on each plane
CXI _{ML}		

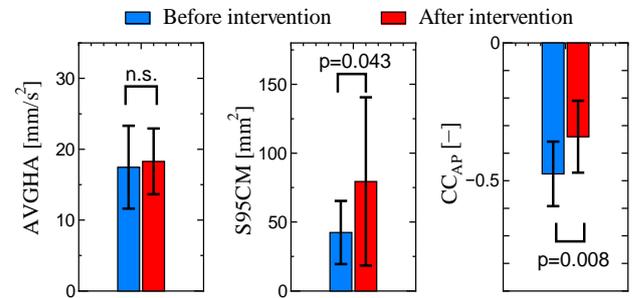


Fig. 2 The mean and standard deviation of the three balance evaluation indices (AVGHA, S95CM, CC_{AP}) during quiet standing with eyes closed before and after the intervention.

たことが示唆されたため、今後は体性感覚の過敏になることでめまい等を発症している場合の簡易な介入方法として、本手法を検討していく予定である。

文献

- (1) 園部元康, 井上喜雄, ”一定周波数で揺動する台車における立位バランス応答 (力学モデルに基づく定常応答特性の理解)”, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.898 (2021).
- (2) Sonobe, M. and Inoue, Y, “Center of mass estimation using a force platform and inertial sensors for balance evaluation in quiet standing”, Sensors, Vol. 23, No. 10 (2023).
- (3) 園部元康, 光武翼, “ノイズ前庭電気刺激が立位の姿勢制御戦略に及ぼす影響”, 日本機械学会 2024 年度年次大会, (2024).