

卒業論文要旨

一定周波数揺動に対する座位姿勢制御の基本戦略

システム工学群

動的デザイン研究室 1230028 大楯 司

1. 緒言

ヒトが日常的にとる姿勢として立位と座位がある。それらのバランス評価を行う方法として、安静時の姿勢を台車上で水平方向に一定の周波数で揺動したときの応答を解析する手法がある⁽¹⁾。動的デザイン研究室では、この方法を用いて立位のバランス応答を調査してきた。その結果、図1に示すように揺動周波数に応じた姿勢制御の変化が見られた⁽²⁾。一方、座位では調査が行われておらず、立位と同様の応答になるか不明である。

具体的に不明な点は3つある。1つ目に、「境界周波数」と名付けている足関節トルクを用いずに頭部が空間に固定される周波数である。立位では境界周波数が約0.7Hzになることが判明しているが、座位でも同様の大きさになるか不明である。

2つ目に境界周波数より高周波での応答である。立位では、股関節戦略の介入により頭部を空間に固定することができるが、座位では股関節戦略に対応する戦略が使えない。そこでどのような応答を示すのか不明である。

最後に低周波側での応答である。立位では0.4Hz付近で頭部を空間に固定するような頭部制御から頭部を支持面に固定するような重心制御へ移行する。立位の姿勢制御では体性感覚が支配的だが、座位では下半身の感覚が支配的とは考えづらく、視覚や前庭感覚といった他の姿勢制御に関わる感覚が支配的になる。そうすると頭部の揺れに対して敏感になり、重心制御が生じにくく、戦略の切り替えが立位の0.4Hzより小さい周波数で生じると考えられる。

そこで本研究では、座位の姿勢制御の調査、具体的には、①座位の境界周波数、②高周波での姿勢応答、③低周波帯域での戦略の切り替えについて調査することを目的とする。

2. 身体モデルによる境界周波数の導出

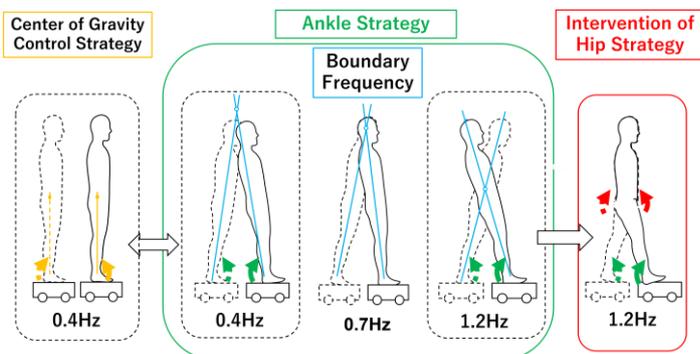


Fig. 1 Constant frequency sway in standing position

座位の境界周波数の理論値を図2に示した座位の身体モデルと表1に示した身体パラメータから導出した。

身体パラメータとは、身体が5個の剛体セグメントにより構成される身体モデルにおいて、各セグメントの質量 m 、長さ L 、質量中心位置 l 、慣性モーメント J を被験者の体重 M と身長 H の関数として表したものである。本研究で用いた身体パラメータは文献⁽³⁾を参考に決定した。

図2の身体モデルにおいて、上半身の運動方程式は次のようになる。

$$\left(\frac{J_u}{l_u} + m_u l_u \right) \ddot{x}_u - m_u g x_u = -m_u l_u \ddot{x}_s \quad (1)$$

式(1)に身体パラメータを適用した後、支持面振幅で正規化し、さらに、空間に対し頭部変位が静止する条件に当てはめると、身長に基づいた境界周波数 f_b は以下の式で示される。

$$f_b = \frac{1}{2\pi H} \sqrt{\frac{g}{\beta h - \alpha}} \quad (2)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{J_u}{l_u} + m_u l_u = 0.151 \\ \beta &= l_u = 0.128 \\ h &= \frac{L_u}{l_u} = 2.241 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Table 1 Physical parameters of sitting model.

Segment	Symbol	Value
Upper Body	m_u	0.506M
	J_u	$1.11 \times 10^{-2} MH^2$
	L_u	0.288H
	l_u	0.128H

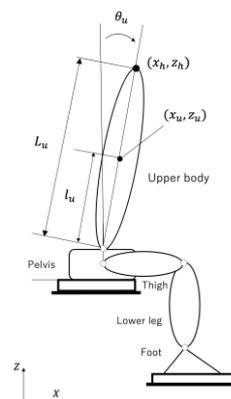


Fig. 2 Sitting model

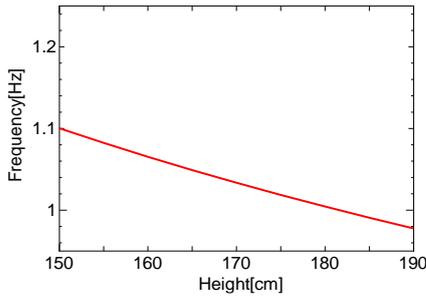


Fig. 3 Boundary Frequency

式(2)により被験者身長 H に基づいた境界周波数の分布は図3のようになった。座位の境界周波数は身長 170cm の場合、1.0Hz となり、立位の 0.7Hz より大きくなった。

3. 検証実験

被験者は、研究室内の 20 代の健康的な男性 5 名 (A~E, 身長 174.2 ± 5.0 cm, 体重 60 ± 8.7 kg) とした。被験者には台車上の背もたれがない座面に、腕を身体の前で自然に下ろし、膝の角度が 90 度で腰をかけるように指示した。計測には光学式モーションキャプチャー (OptiTrack V120 Trio) を用い、マーカーを台車と被験者後頭部に装着した。揺動は、0.2, 0.3, 0.4, 0.9, 1.1, 1.3Hz に周波数を設定し、各周波数での揺動を 3 回ずつ行った。

0.9, 1.1Hz での揺動は、前述の境界周波数の理論値の妥当性を確認するために設定した。理論値は約 1.0Hz だが、実際の揺動と一致するか不明であり、1.0Hz 前後の 0.9Hz と 1.1Hz で明らかにする。

次に股関節戦略に相当する戦略が使えない座位姿勢での応答を明らかにするために 1.3Hz を設定した。

最後に 0.2Hz~0.4Hz, 0.9Hz の揺動で、低周波での戦略の切り替えを明らかにする。座位では頭部の揺れに対して敏感になることから、重心制御が起こりにくく、戦略の切り替えが立位の 0.4Hz より低い周波数で生じると考えられる。

4. 実験結果

まず、境界周波数の妥当性の評価を被験者の頭部変位振幅により行った。結果を図 5 に示す。被験者 E を除いて頭部変位が 0.9Hz で最大、1.1Hz のとき最小、1.3Hz で増加する傾向から、境界周波数は約 1.0Hz となると考えられ、理論と実条件がほぼ一致することが分かった。

続いて高周波帯域での評価を空間座標系における 1.3Hz での被験者頭部変位と台車変位の時系列波形で図 6 に示す。グラフより、境界周波数より高い周波数帯域では、頭部の揺れを抑制することができず、台車変位に対して逆位相で揺動することが分かった。

最後に低周波帯域での戦略の切り替えの調査結果を図 7 に台車に対する頭部の相対変位で示す。上半身を 1 リンクの剛

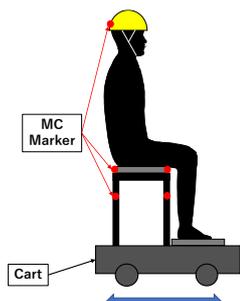


Fig. 4 Diagram of experiment

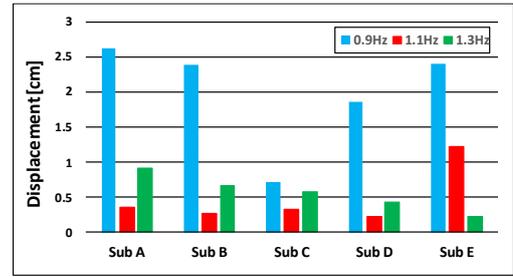


Fig. 5 Absolute Head Displacement (0.9~1.3Hz)

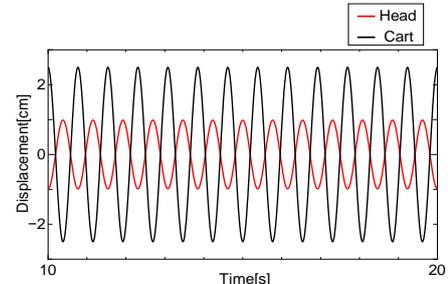


Fig. 6 Head displacement at 1.3Hz (subject D)

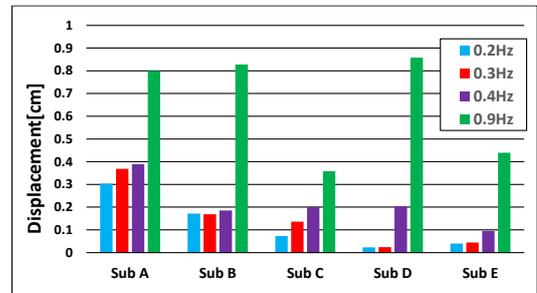


Fig. 7 Relative Head Displacement(0.2~0.9Hz)

体リンクと考えると、相対変位が 0 のとき頭部を支持面に固定する重心制御、0 より大きいとき頭部制御となる。図 7 より、0.2~0.4Hz は相対変位が 0 に近いので重心制御になり、0.9Hz では他の周波数に比べて相対変位が大きいので頭部制御を行っていることが読み取れる。したがって、座位の戦略の切り替えは予想と反し、立位の 0.4Hz よりも高い周波数で生じることが判明した。

5. 結言

本研究では、座位の姿勢制御を一定周波数揺動によりその基本特性を調査した。その結果、座位では立位と異なる基本特性を示すことが分かった。今後はモデリングによる定量的な評価指標の作成に取り掛かりたい。

文献

- (1) Ghai, S., Nardone, A. and Schieppati, M., Human balance in response to continuous, predictable translations of the support base: Integration of sensory information, adaptation to perturbations, and the effect of age, neuropathy and Parkinson's disease, *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 24 (2019).
- (2) 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, *日本機械学会論文集*, Vol. 85, No. 877, 2021.
- (3) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志, 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, *バイオメカニズム*, 11 巻(1992), pp. 23-33