

卒業論文要旨

ハイヒール靴着用時の支持面揺動に対する立位バランスの変化

システム工学群

動的デザイン研究室 1220119 西江 未有

1 緒言

履き物を着用した場合の人の立位バランスについては、Dong Sun ら⁽¹⁾によって研究が行われてきた。外部刺激に対する立位バランスについて、多くの研究が行われているが、履き物を着用した場合の人の立位バランスと、履き物の関係性は不明な点が多い。また、人のバランス能力を正確に評価するためには、履き物を着用した状態での、立位バランスを評価する必要がある。

これらの課題から、本研究の目的は、素足、スニーカー、ハイヒールを履いた場合の矢状面方向の水平揺動に対するバランスの評価をすることである。先行研究⁽²⁾の手法を用いてモデリングを行い、周波数応答解析によりバランスシステムの伝達関数、各パラメータを同定した。同時に、先行研究の手法の履き物着用時への妥当性を検証した。

2 制御モデリングの定義

本研究において、モデリングは、支持面の水平加速度を入力としたときの質量中心変位を出力とした応答を、数学モデルで表す。数学モデルは機構モデルと内部バランスから構成される。矢状面バランスにおいて、人の動作は2リンクモデルの運動と考えられるが、本研究は、重心の動きのみを考えるため、図1のような機構モデルを用いる。このモデルは、身体部が足関節回りに回転運動し、水平運動が可能である。各変数に対し、支持面は s 、身体部は m 、足部は f の添え字で表現する。座標系は、前方を x 軸、鉛直方向を z 軸とする右手系とする。 (X, Z) は絶対座標系、 (x, z) は足関節を原点とする。質量中心の変動が微小であると仮定して近似線形化を行うと、図2.1のモデルの運動方程式は次式ようになる。

$$\left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b \right) \ddot{x}_b - m_b g x_b = -m_b l_b \ddot{X}_s + N_a \quad (1)$$

矢状面方向の内部バランスを制御するために、足関節トルク N_a をフィードバック関数で定義した。本研究では、内部バランスの制御則を、状態遅延フィードバックと、目標姿勢の調整を組み合わせることで次の制御則を仮定した。

$$\begin{aligned} N_a &= -K_p \{x_b(t-T_D) - \bar{x}_b(t-T_D)\} - K_D \dot{x}_b(t-T_D) \\ T_R \dot{\bar{x}}_b + \bar{x}_b &= -G_R \dot{X}_s \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)の機構モデルと、式(2)の制御則から、入力を支持面加速度、出力を質量中心変位とする伝達関数を導出すると次のようになる。

$$G(s) = \frac{\hat{x}_b(s)}{\hat{A}_s(s)} = \frac{-m_b l_b T_R s^2 - m_b l_b s - G_R K_p e^{-T_D s}}{s(T_R s + 1) \left\{ \left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b \right) s^2 + K_D e^{-T_D s} s + K_p e^{-T_D s} - m_b g \right\}} \quad (3)$$

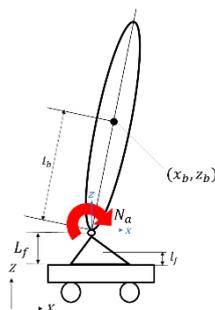


Fig1. link-model

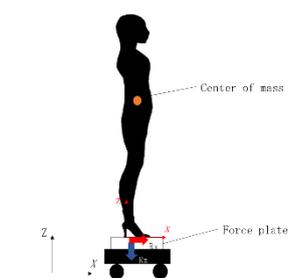


Fig2. Outline of the experiment

A_s, X_b は、それぞれ支持面の加速度、質量中心変位をラプラス変換した後の変数である。

3 周波数応答実験

3.1 実験

本実験では、立位時に矢状面方向の揺動を与えたときの、人のバランス応答を確認する。20代の女性被験者12名に対し、電動台車を用いた支持面の水平揺動実験を行った。フォースプレート計測に基づいた質量中心変位の推定精度を検証するため、うち3名に対しモーションキャプチャ計測を行った。計測時間は65秒とし、素足、スニーカー、ハイヒールの条件で、それぞれ6回ずつ計測した。実験の概要を図2に示す。被験者には、フォースプレートの上に乗る、手を自然に下ろし、まっすぐ前を見るように指示した。繰り返し実験を行うときの被験者の揺れに対する慣れを考慮して、位相の組み合わせを5パターン用意し、順に変えながら実験を行った。

3.2 結果

図4に、被験者1のハイヒール着用時の周波数応答線図を示す。フォースプレート計測から得られた周波数応答関数はモーションキャプチャ計測から得られた周波数応答線図と概ね一致しており、質量中心変位の推定精度は十分であるといえる。

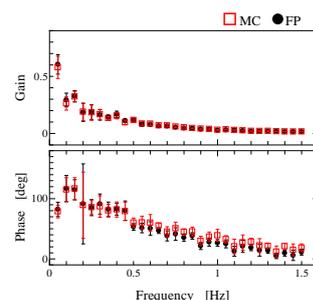


Fig4. Frequency response diagram.(Subject1)

4 履き物と個人のバランス評価

履き物ごとにバランス特性の違いをみるために、t検定を用いて、同定パラメータの有意差を履き物ごとに判定した。判定結果を表2に示す。表2から、素足とハイヒールの間、スニーカーとハイヒールの間で、位相余裕に有意差があることが示された。図5には、位相余裕と質量中心変位のばらつきを示した。黒が素足、青がスニーカー、赤がハイヒールの値を示す。表1と図4から、ハイヒール着用時は支持基底面が狭くなり不安定になるため、位相余裕を高めて重心の揺れを低減させる傾向があることが考えられる。

制御戦略の個人差が大きいいため、被検者別にバランス特性を評価した。ここでは、文献⁽³⁾⁽⁴⁾に従って、インナーループのみのシステムを考え、パラメータ K_p, K_D, t_D で安定領域を示す方法を用いた。インナーループのみのシステムは以下の式で表される。

$$\left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b \right) \ddot{x}_b - m_b g x_b = -K_p x_b(t - T_D) - K_D \dot{x}_b(t - T_D) \quad (4)$$

表現の簡略化のため、左辺の第1項で両辺を割ると次のようになる。

$$\ddot{x}_b - \omega_n^2 x_b = -k_p x_b(t - T_D) - k_D \dot{x}_b(t - T_D) \quad (5)$$

ここで、

$$\omega_n^2 = \frac{m_b l_b}{J_b + m_b l_b^2}, k_p = \frac{K_p l_b}{J_b + m_b l_b^2}, k_D = \frac{K_D l_b}{J_b + m_b l_b^2} \quad (6)$$

と表される。式(5)の特性方程式の特性根に対し、特性根が全て複素平面上の左側に存在するとき、システムは安定となる。この安定境界の条件から、 t_d を任意の値に固定したとき、図5の実線のように k_p, k_D が示すD字型の安定領域を得る。安定領域の中でも、支配的な特性根(実部が最大の特性根)が三重根であるとき、最も収束が速く効率の良い制御であるとみなす。図5に、三重根のときの理論値のパラメータを○、三重根ときの実験値から得られたパラメータを×で示す。実験から同定したパラメータの中で、 k_p の値は被験者が履き物を変更してもほとんど値が変わらなかったことから、 k_p を任意の値に固定して導出した安定領域を図6に示す。図5、図6は被験者5の安定領域を示している。図5と図6から、被験者5は、ハイヒール着用時に対して遅延時間を調整することで効率的な制御に近づくことで揺れを低減させていることが分かる。

5 結言

本研究では、ハイヒール靴着用時の支持面揺動に対するバランス特性を、履き物と被験者別に評価することができた。被験者全体では、ハイヒール着用時は、揺れを低減させる目的で位相余裕を高める制御戦略をとる傾向があることが示された。また、制御戦略は個人差が大きいいため、被検者ごとに安定領域を導出することで各被験者のバランス特性を評価した。

Table1. p value of t-test

| | BF-SN | BF-HH | SN-HH |
|-------|-------|-----------------|-----------------|
| P_m | 0.154 | 4.46E-04 | 3.25E-06 |

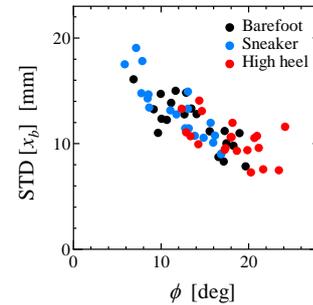


Fig4.Phase margin and STD of COM

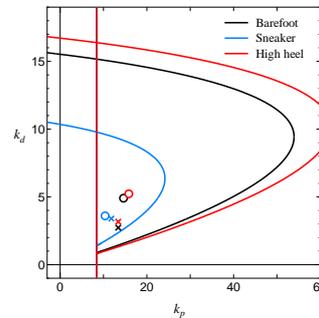


Fig5.Stability diagram for delayed PD feedback(Subject5)

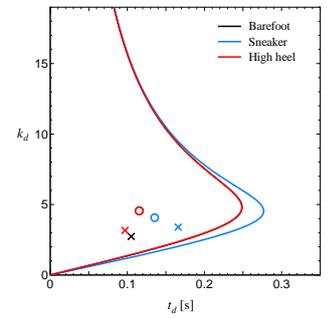


Fig6.Stability diagram for delayed DT_D feedback(Subject5)

参考文献

- 1) Dong Sun, Yaodong Gu, Qichang Mei, Yanhao Shao, Jianjun Sun & Justin Fernandez, 'Effect of Heel Heights on Female Postural Control During Standing on a Dynamic Support Surface With Sinusoidal Oscillations', Journal of Motor Behavior, Vol49, 2017
- 2) 成田和樹, "支持面水平揺動に対する定常応答に基づく矢状面立位バランスモデルの推定", 高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻 令和2年度 修士学位論文.
- 3) Insperger, T., and Milton, J.: 'Delay and Uncertainty in Human Balancing Tasks' (2021)
- 4) Zeleni, A., Milton, J., Stepan, G. and Insperger, T.: 'Response to perturbation during quiet standing resembles delayed state feedback optimized for performance and robustness', Scientific Reports, 2021, 11, (1), pp. 11392