

立位人体の支持面強制振動時におけるバランス戦略の変化

Transition of balance strategies according to forced sway motion during standing

システム工学群

知能メカトロダイナミクス研究室 1180154 松本 圭紀

1. 緒言

近年、歩行や立位の維持が困難な高齢者や障がい者に対して機能改善を目的としたリハビリ機器の開発、販売がされている。しかし、身体機能のメカニズムが十分に解明されていないため、効果的なリハビリの実施が難しく、各症例に対するリハビリプランの検討は手探りで行われている。

立位時のバランスを改善する機器のひとつに(株)テック技販のBASYSがある。対象は、自立的な姿勢調整が損なわれている高齢者、反射亢進や起立性振戦などにより立位姿勢動揺の大きい患者⁽¹⁾である。患者をプレート上に立たせて使用する。この機器はプレートが矢状面方向のみに動作し、圧力中心 (CoP) の動揺をフィードバックすることで自然な立位状態に改善させるものである。このような機器を用いて単一周波数で支持面を強制振動させると、圧力中心フィードバックの有無によりモードの変化が生じる。

そこで、本研究ではこの現象の応答を計測し、簡易モデルによってモード変化の理由を明らかにすることを目的とする。矢状面の運動では腰・ひざ・足首が曲がるのに対し、前額面では人体を単一剛体振子で置き換えやすい。そこで、本研究は前額面を対象として実験と解析を行った。単一周波数での揺動の場合、質量中心 (CoM) と圧力中心の関係は振幅比と位相差で決定できるため、これを実験で調べる。圧力中心フィードバックの有無による変化を実験と解析により確認する。

2. 単一周波数揺動時の運動のモデル化

立位姿勢で支持面上にある人体のモデルを図1に示す。本研究では、人体を足部と身体部からなる単一剛体振子モデルで考える。足部は支持面に固定、身体部のみが足関節まわりに回転できる。支持面は水平方向のみに動くことができる。

X が絶対座標系、 x が支持面を基準とした相対座標系の水平変位を表す。相対変位の原点は両足の中心とする。 l [m] は足関節から身体部の質量中心までの距離、 θ_b [rad] は身体部の質量中心と足関節を結ぶ直線の鉛直軸からの傾斜角度とする。以下では、 θ_b が微小、身体の上下加速はしない、足部の質量は無視できるとする。 X_s [m] を支持面の絶対変位、 x_b [m] を身体部の質量中心の相対変位、 x_p [m] を圧力中心の相対変位とする。重力加速度を g [m/s²]、身体部の質量を m [kg]、身体部の質量中心まわりの慣性モーメントを J [kgm²]、足関節トルクを τ [Nm] として運動方程式を立てると次のようになる。

$$(J + ml^2)\ddot{\theta}_b - mgl\theta_b = \tau + ml\ddot{X}_s \quad (1)$$

人体に与える強制変位が角周波数 ω rad/s の単一周波数とする、

$$X_s = A \cos \omega t + \alpha x_p, \quad \ddot{X}_s = -A\omega^2 \cos \omega t + \alpha \ddot{x}_p \quad (2)$$

となる。 α は圧力中心フィードバックのゲインである。この強制振動解を解くために、複素解法を用いる。定常状態であ

るとき、質量中心、圧力中心の複素変位をそれぞれ z_b , z_p とおくと次の関係が定義できる。

$$z_p = \gamma e^{i\phi} z_b \quad (3)$$

式(3)より質量中心と圧力中心は振幅比 γ と位相差 ϕ のみで関係付けられ、 γ と ϕ は人のバランス制御則に依存する。

3. 単一周波数揺動実験

3.1 実験装置

本研究では、立位人体の支持面に強制変位を与えるために電動スケートボードを用いる。これは市販の電動スケートボードを改造したものであり 450W のモータで駆動する。図2に示す電動スケートボードにより、搭乗者の支持面に単一周波数の変位振幅を与え、圧力中心の変化を計測する。

装置には床反力計を2枚取り付けており、各床反力計の四隅に1軸ロードセルを配置している。圧力中心の計測は床反力計で行う。

一方、ヒトの質量中心の導出には OptiTrack 社製のモーションキャプチャ (カメラ V120: Trio) を用いる。質量中心は身体に貼り付けたマーカから文献⁽²⁾を参考に導出した。

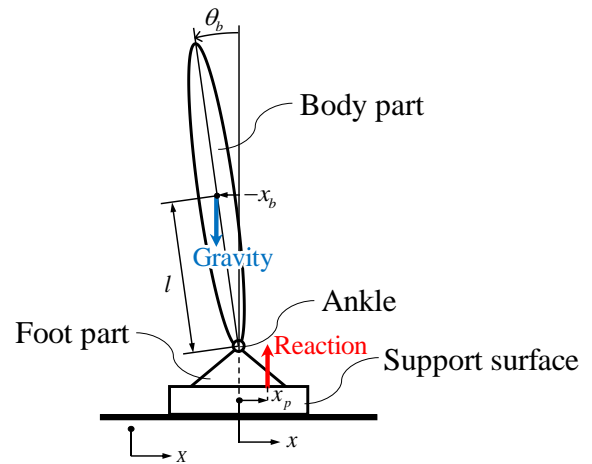


Fig. 1 Rigid body model

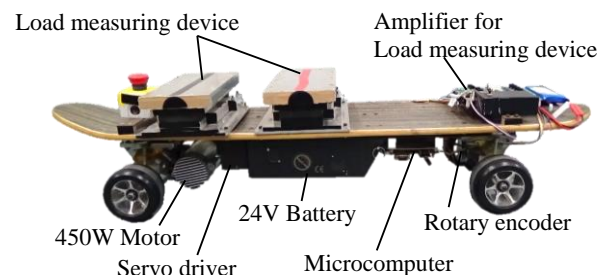


Fig. 2 Electric skateboard

3.2 実験概要

被験者は健康な 20 代男性 2 名である。スケートボード(支持面)に与えた強制変位について説明する。支持面に与えた変位は sin 波であり、揺動振幅は $A=100, 150, 200\text{mm}$ の 3 通りとし、揺動周波数は 0.2Hz で統一した。揺動回数は 12 周期 (60 秒) とし、12 周期の前後それぞれ 2 周期で予備揺動を行う。予備揺動の区間で揺動の振幅を線形的に増減させる。圧力中心のフィードバックゲインは $\alpha=0.0, 0.2$ の 2 通りとした。被験者は、靴を脱いだ状態で床反力計の上に立たせた。揺動中は自然な姿勢で視線は前方に向けるよう指示した。スタンス幅は 230mm とした。

前提条件より、定常な計測データのみを解析に用いる必要がある。揺動回数が 12 周期の場合の定常性の評価方法を示す。図 3 のように解析に用いた範囲は予備動作を除く 7~12 周期目とする。計測した圧力中心を 1 周期ごとに区切り、 k 周期目の値を $x_{p(k)}$ とおく。各周期の最初の時間 t を 0 とするとき、圧力中心の平均値 $x_{p\text{avg}}(t)$ を次式で表す。

$$x_{p\text{avg}}(t) = \frac{\sum_{k=7}^{12} x_{p(k)}(t)}{6} \quad (4)$$

k 周期目の圧力中心について平均値との誤差 e_k ($k=7, 8, \dots, 12$) を次のように定義する。

$$e_k = \int_0^T (x_{p\text{avg}}(t) - x_{p(k)}(t))^2 dt \quad (5)$$

e_k の平均を E として、これを定常であることの評価指標とする。この評価指標に従って以下の解析に用いる計測データは、 E が任意で設定した値を下回るものとした。

4. バランスモデルの評価

モデルの評価には、質量中心に対する圧力中心の振幅比 γ と位相差 ϕ を用いる。

図 4 に実験結果から得られた γ と ϕ の関係の一例を示す。振幅比 γ と位相差 ϕ の導出にはフーリエ級数展開を用いた。揺動振幅や圧力中心フィードバックの有無による違いは確認できなかった。

また、揺動振幅や圧力中心フィードバックによる影響を確かめるため、2 章のモデルを用いて解析を行った。ここで、式(1)について $\theta_b = -x_b/l$, $\tau = mgx_p$ とする。式(2)と式(3)を代入し、特解を $z_p = Z_p e^{i\omega t}$ とおくと圧力中心と揺動振幅 A の関係が得られる。

$$|Z_p| = \left| \frac{ml^2\omega^2}{mgl\{1 - (\gamma e^{i\phi})^{-1}\} - \omega^2\{(J + ml^2)(\gamma e^{i\phi})^{-1} + ml^2\alpha}\}} \right| A \quad (6)$$

一般的に圧力中心の振幅は支持基底面より小さくなる必要がある。 $|Z_p|$ の取れる範囲には制限がある。このことから、ヒトは支持面の揺れに大きさに応じて γ と ϕ の値も変化させていると予想する。足関節から身体部の質量中心までの距離 l , 身体部の質量中心まわりの慣性モーメント J はマーカの位置から文献(2)を参考に導出した。図 5 に式(6)を用いて導出した γ , ϕ と圧力中心の振幅 $|Z_p|$ の関係を示す。揺動振幅が大きい場合や圧力中心をフィードバックしたときには、 $\phi=0$ 付近の振幅が大きくなるため、 ϕ を増大させる必要があることがわかった。

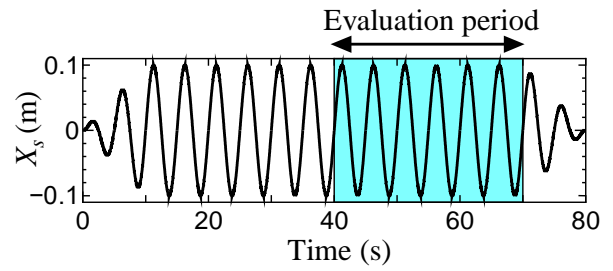


Fig. 3 Forced vibration of support surface ($A=100\text{mm}$)

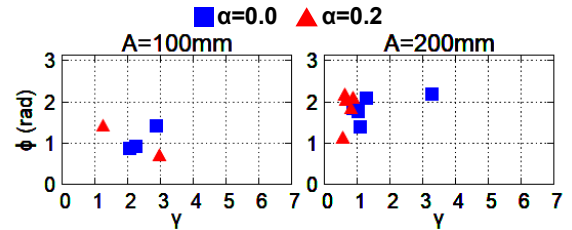


Fig. 4 Relationship between γ and ϕ

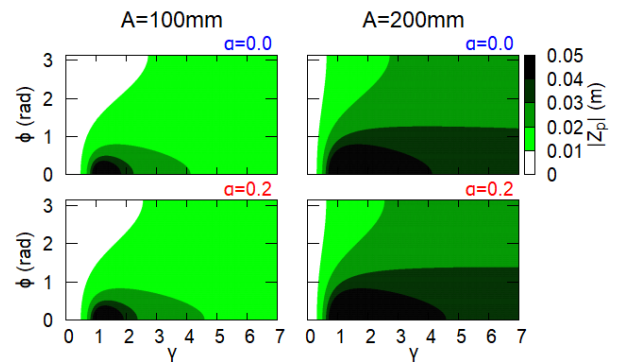


Fig. 5 CoP amplitude with balance control and CoP feedback

5. 結言

本研究では、立位人体の支持面に強制変位を与えたときの人体の応答を明らかにするため、単一周波数揺動実験を行い、単一剛体振子モデルによる解析結果と比較した。まず、人体を単純に表すため、定常な倒立振子のモデルとした。次に、矢状面で表れる位相変化を前額面で再現するために圧力中心をフィードバックする実験を行ったところ、フィードバックや支持面振幅による位相差や振幅比の違いは確認できなかった。モデルによる解析では圧力中心と γ - ϕ の関係の違いが確認できた。今後は矢状面で確認する。

文献

- (1) BASYS | 製品案内 | 株式会社テック技販, available from <<http://www.tecgihan.co.jp/products/basys/>>. (参照日 2018 年 1 月 17 日).
- (2) D.Gordon E. Robertson, Saunders N. Whittlesey, Graham E. Caldwell, Gary Kamen, Joseph Hamill, “身体運動のバイオメカニクス研究法”, 大修館書店 (2008), pp. 65-68.