

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

Estimation of the standing balance model on sagittal plane based on the steady response on a sway board

知能機械工学コース
動的デザイン研究室 1235089 成田 和樹

1. 緒言

立位におけるバランス特性をモデル化し、個人のパラメータを同定できれば、精密な評価・診断が可能になるため、数多くの研究が行われてきた。代表的な研究として、Park らによるインパルス応答解析⁽¹⁾や Kooij らによる周波数解析⁽²⁾がある。これらの研究結果に対し、すべての被験者データに対して望ましいパラメータを同定できないことである。次に、多くの場合得られたモデルが不安定系となる課題がある。

これに対し、我々の研究グループは支持面加速度に対する質量中心の運動に對象を限定して、適切なバランスモデルを検討してきた。前額面を対象としたモデリングでは、遅延状態フィードバックと支持面速度に応じた目標姿勢を組み合わせたモデルを提案し、周波数応答解析から安定解が確実に得られることを報告した⁽³⁾。しかし、人を対象としているため、再現性を得るための実験回数や、0.1Hz 前後の低い周波数特性を得るために長時間の実験が必要となる。また、質量中心の計測はカメラを用いた計測が一般的であり、被験者への負担が大きい。

本研究では矢状面を対象としたモデルを作成し、パラメータ同定を行う。その際に、上記のような負担を軽減するため、計測法や同定方法の簡易化を提案する。具体的には、質量中心計測をカメラ計測からフォースプレート(以下、FP)を用いた質量中心推定法⁽⁴⁾に変更するとともに、信頼できる同定結果を得るために必要な実験回数や実験時間を明らかにする。

2. 周波数応答実験

本実験では、立位時に支持面を水平に揺動させたときの矢状面の質量中心を計測する。被験者 20 代男性 7 名(身長 175 ± 5cm、体重 65 ± 10kg)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。計測時間は 65 秒とし、最初の 5 秒間を準備時間として、60 秒を解析時間とした。計測回数は 10 回とした。実験の概要図を図 1 に示す。被験者には、裸足でフォースプレートに乗り、手を自然に下ろし、広い視野で水平前方を見るように指示した。

支持面の揺動加速度は以下の式で与えた。

$$a_{ref} = A \sum_{k=1}^{20} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (1)$$

式(1)は、周波数が 0.05Hz~1.0Hz の 0.05Hz 刻みの 20 個の cos 波を重ね合わせたものである。振幅 A は、 $A = 1.115 \times 10^{-2}$ で台車の最大加速度が $0.1m/s^2$ となるように調整した。位相 ϕ_k は、加速度のヒストグラムが $\sigma=0.5$ の正規分布に近づくように調整した。本研究では、予期できない揺動に対するモデリングを行うため、位相の異なるパターンの揺動を 5 つ生成し、それを順に変えながら実験を行った。また、被験者 3 名に対し、モーションキャプチャ(以下、MC)による姿勢の計測を同時に行った。

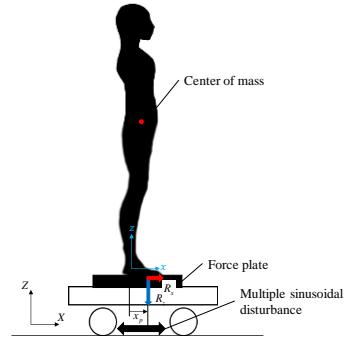


Fig. 1 Outline of the experiment.

3. FP 計測に基づく姿勢推定

3.1 1 リンクモデルに基づくリアルタイム質量中心推定

質量中心推定では図 2 のモデルを用いる。このモデルは、身体部が足関節まわりに回転運動し、支持面は水平移動可能とする。各変数に対し、支持面は s 、身体部は b の添え字で表現する。座標系は、前方を x 軸、鉛直上方を z 軸とする右手系とする。 (X, Z) は絶対座標系の変位、 (x, z) は足関節を原点とする相対座標系の変位とする。

式(2)より、質量中心変位を推定できる。

$$\ddot{x}_b = \frac{1}{m_b g} \left[- \left\{ \frac{M J_b}{m_b l_b} + m_f (L_f - l_f + l_b) \right\} \ddot{X}_s - \left(\frac{J_b}{m_b l_b} + L_f + l_b \right) R_x + M g x_p \right] \quad (2)$$

その際に必要な身体パラメータは文献⁽⁵⁾を参考に定義した。

式(2)で得られた質量中心変位と支持面加速度から入力を支持面加速度、出力を質量中心とした伝達関数を求める。低周波帯域(0.05~0.35Hz)では、揺動が定常的でないため、実験ごとの質量中心のばらつきが大きい。このばらつきを低減するため、伝達関数の導出法として H1 推定を用いる。定義式を以下に示す。

$$H_1(f) = \frac{\overline{C_{xy}(f)}}{\overline{P_{xx}(f)}} \quad (3)$$

ここで、 C_{xy} は入力と出力のクロススペクトル、 P_{xx} は出力のパワースペクトルである。

3.2 周波数解析に基づく 2 リンクモデルの質量中心推定

高周波帯域(0.40~1.0Hz)では 2 リンクモデルの運動が生じる。そこで、周波数領域の運動方程式から上半身と下半身の質量中心を推定する。用いる 2 リンクモデルを図 3 に示す。このモデルは、足部は支持面に固定、下半身は足関節まわり、

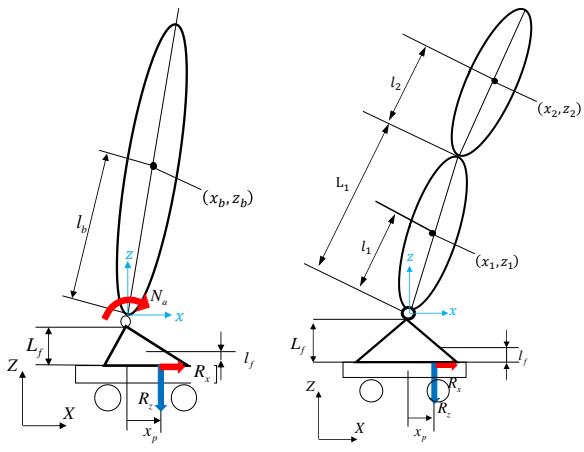


Fig. 2 Single-link model.

Fig. 3 Double-link model.

上半身は股関節まわりに回転する。以下では、添え字として、支持面は s 、足部は f 、下半身を 1、上半身を 2 とする。座標系の定義は 1 リンクモデルに準ずる。

このモデルの並進運動と回転運動に関する運動方程式から角振動数 Ω の定常振動の式は次式で得られる。

$$-m_1\Omega^2\bar{x}_1 - m_2\Omega^2\bar{x}_2 = M\Omega^2\bar{X}_s \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{J_1}{l_1} + m_1l_1 - \frac{J_2L_1}{l_1l_2}\right)\Omega^2\bar{x}_1 - \left(\frac{J_2}{l_2} + m_2(L_1 + l_2)\right)\Omega^2\bar{x}_2 \\ & -m_1g\bar{x}_1 - m_2g\bar{x}_2 = -\left\{m_f(L_f - l_f) - m_1l_1 - m_2(L_1 + l_2)\right\}\Omega^2\ddot{X}_s \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)、式(5)の解 \bar{x}_1, \bar{x}_2 から 1 リンクの質量中心の定常解が次式で求まる。

$$\bar{x}_b = \frac{m_1}{m_b}\bar{x}_1 + \frac{m_2}{m_b}\bar{x}_2 \quad (6)$$

3.1 節と同様に、式(6)で得られた質量中心変位と支持面加速度から伝達関数を求める。高周波帯域では、H1 推定を行わず、支持面加速度と質量中心をフーリエ変換し、入力を支持面加速度、出力を質量中心とした伝達関数とする。

4. 矢状面モデリング理論

機構モデルは図 2 に示す 1 リンクモデルとする。質量中心の変動が微小として近似線形化を行うと、運動方程式は次のようにになる。

$$\left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b\right)\ddot{x}_b - m_b g x_b = -m_b l_b \ddot{X}_s - N_a \quad (7)$$

足関節モーメント N_a は状態遅延フィードバック制御と支持面の速度に応じた目標姿勢の調整を組み合わせたカスケード制御系と仮定し、以下の式を定義する。

$$\begin{cases} N_a = k_p \{x_b(t-t_d) - \bar{x}_b(t)\} + k_d \dot{x}_b(t-t_d) \\ T_c \ddot{x}_b + \bar{x}_b = \alpha \dot{X}_s \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 \bar{x}_b は支持面速度に応じた目標姿勢である。また、 k_p, k_d は状態フィードバックゲイン、 t_d は遅延時間、 T_c は支持面速度と目標重心変位の間の 1 次フィルタ、 α は支持面速度と目標重心変位の関係を表す比例定数である。これら 5 つの未知パラメータを実験結果から同定し、個人のバランス特性を明らかにする。

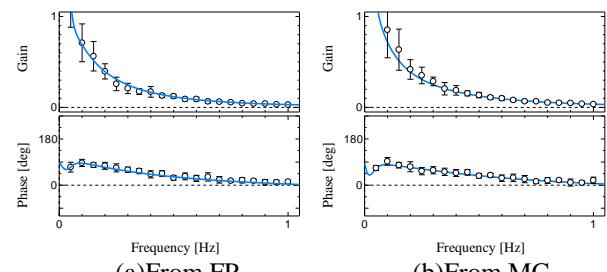


Fig. 4 Frequency response diagram. (Subject 1)
(a)From FP
(b)From MC

Table. 1 Balance control parameters identified from frequency response test.

	Subject					
	1		2		7	
	FP	MC	FP	MC	FP	MC
k_p	725.5	709.7	634.1	609.9	807.3	807.8
k_d	235.1	253.7	243.4	265.5	347.2	359.9
t_d	0.162	0.185	0.158	0.169	0.179	0.174
T_c	2.675	2.946	2.248	2.349	1.382	1.574
α	-0.028	-0.021	-0.036	-0.039	-0.013	-0.019

5. 伝達関数のフィッティングとパラメータ同定

式(7)、(8)から得られる伝達関数と実験データに基づいて、非線形最小二乗法によるフィッティングを行った。同定したパラメータを含む伝達関数から得られる周波数応答線図を図 4 に青線で示す。周波数応答線図について、入力を支持面加速度、出力を質量中心変位とした。10 回の実験の平均を○印で、標準偏差をエラーバーで示す。同定したパラメータを表 1 に示す。また、質量中心推定手法の精度検証のため、MC で計測された質量中心を用いた伝達関数と、FP 計測に基づいて推定された質量中心を用いた伝達関数、パラメータ同定結果を示す。図 4、表 1 より、手法に大きな違いはなく、類似した周波数応答線図、パラメータであると考えられる。

6. 結言

本研究では、矢状面の立位バランスに対するモデリングとパラメータ同定手法を提案し、個人のバランス特性を評価できることを示した。また、モデリングに必要な実験の負担軽減のため、質量中心計測の簡易化を目指し、MC による計測から FP 計測に変更し、精度検証により、得られる伝達関数に大きな違いがないことを確認した。

文献

- Park, S., Horak, F.B., Kuo, A.D., 2004. Postural feedback responses scale with biomechanical constraints in human standing. Experimental Brain Research 154, 417-427.
- Van der Kooij, H., Donker, S., De Vrijer, M. and Van Der Helm, F., IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 3 (2004), pp. 2535-2541.
- 園部元康, 井上喜雄, 芝田京子, モデリングに基づく支持面水平揺動時の個人の立位バランス特性の評価, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.872, 2019.
- 成田和樹, 園部元康, フォースプレート計測に基づく支持面水平揺動時の矢状面バランスモデリング, MoViC 2019, 2019.
- 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-ヒトの形態と運動機能,p22-33.