

卒業論文要旨

立位バランス同定における外部刺激の影響

システム工学群

動的デザイン研究室 1230159 三浦 直人

1. 緒言

人のバランスシステムを同定するための課題は、同定の確実性とモデルの安定性である。過去の研究では、個人特性の確実な同定が実現できず、健康者全体を平均化したバランスシステムを同定している。また、モデルが複雑になりすぎて、得られたシステムが不安定系である事例も多い。これに対し、我々は支持面加速度に対する質量中心の運動を対象を限定して、モデルを検討してきた。先行研究では、機構モデルを単一倒立振り子モデルとし、内部バランスの制御則として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のカスケード制御系として定義することで、個人のバランス評価を可能とした⁽¹⁾。

先行研究では支持面の水平揺動を与えていたが、揺動方法によりモデルの特性が変化する可能性がある。また、先行研究で使用した揺動実験機は医療機器認定を受けておらず、医療現場での使用は現実的ではない。医療機器認定を受けている揺動実験機として(株)テック技販の BASYS というシステムがあるが、揺動幅に制限があり、先行研究の揺動方法を行えないという問題がある。

本研究では、立位バランス同定において、揺動方法の違いが人のバランス応答にどのような影響をもたらすか調査する。特に、小さい支持面の揺動に対する応答の特徴を明らかにし、モデルの妥当性を検証する。

2. 周波数応答実験

本実験では、立位時に支持面を水平揺動させたときの矢状面の質量中心を計測する。被験者の 20 代男性 6 名(身長 $177.2 \pm 4.3\text{cm}$ 、体重 $57.5 \pm 6.1\text{kg}$)に対し支持面の水平揺動実験を行った。被験者 6 名のうち 3 名(身長 $177.7 \pm 3.9\text{cm}$ 、体重 $59.67 \pm 7.4\text{kg}$)については先行研究で使用した揺動機(以下実験機 A)、3 名(身長 $176.7 \pm 4.6\text{cm}$ 、体重 $55.3 \pm 3.3\text{kg}$)については揺動装置(テック技販, BASYS, 以下実験機 B)で実験を行った。被験者は頭部に慣性センサを取り付けられた。実験の概要を図 1 に示す。被験者には、裸足で実験機に乗り、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。実験機 A には揺動幅の異なる 2 種類の揺動を、実験機 B は揺動幅に制限があるため、実験機 A に与えた揺動のうち揺動幅の小さい揺動を与えた。実験計測時間は 65 秒間とし、最初の 5 秒間を準備時間として、残りの 60 秒を解析時間とした。計測回数は 5 回とした。また、実験機 B の揺動実験は、光学式モーションキャプチャを用いた姿勢の計測も同時に行った。

支持面の揺動加速度を以下の式で与えられた。

$$a_{ref} = A \sum_{k=1}^{30} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (1)$$

$$v_{ref} = A \sum_{k=1}^{20} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (2)$$

式(1)は、周波数が $0.05 \sim 1.5\text{Hz}$ の 0.05Hz 刻みの 30 個、式(2)は、周波数が $0.05 \sim 1.0\text{Hz}$ の 0.05Hz 刻みの 20 個の $\cos$ 波を重ね合わせたものである。A は加速度振幅の値で、揺動の最大加速度がそれぞれ 0.15 m/s^2 、 0.20 m/s^2 となるよう調整され、 $A = 1.67 \times 10^{-2}$ とした。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。

3. 2 リンクモデルに基づく質量中心推定

質量中心推定には図 3 のモデルを用いる。このモデルは、下半身と上半身が二重倒立振り子のような運動を行う。以下では、添え字として、支持面は s、身体部は b、足部は f、下半身を 1、上半身を 2 とする。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(3)より、質量中心変位を推定できる。

$$x_b = \frac{A\ddot{x}_1 + B\ddot{x}_2 + C\ddot{x}_s + Mg x_p - L_f R_x}{(m_1 + m_2)g} \quad (3)$$

$$A = \frac{J_1}{l_1} + m_1 l_1 - \frac{J_2 l_1}{l_1 l_2}, \quad B = \frac{J_2}{l_2} + m_2 (L_1 + l_2),$$

$$C = m_f l_f + (m_1 + m_2)(L_f + l_b)$$

式中の身体パラメータは文献⁽²⁾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て時系列データをフーリエ変換し、次式のような周波数応答関数を得る。

$$H(\omega) = \frac{\hat{x}_b(\omega)}{\hat{A}_s(\omega)} \quad (4)$$

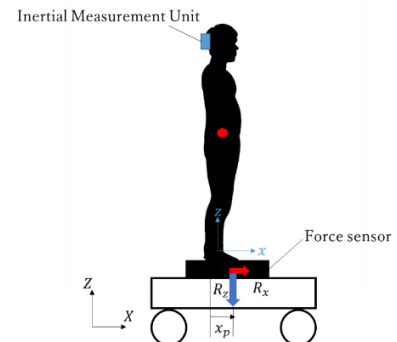


Fig. 1 Outline of the experiment.

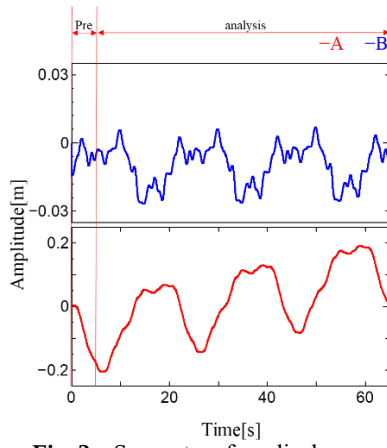


Fig. 2 Support surface displacement

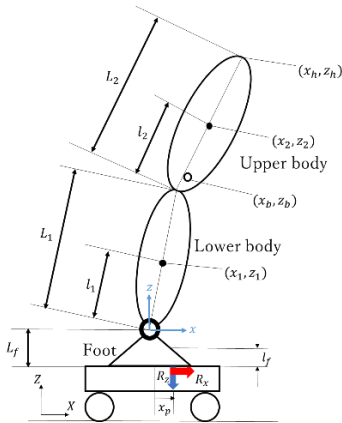


Fig. 3 Double-link model.

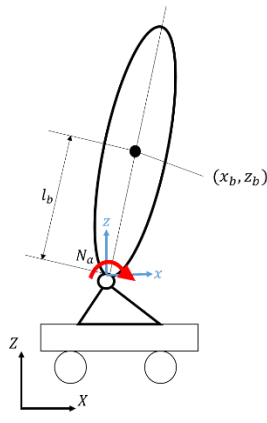


Fig. 4 Single-link model

4. 矢状面モデリング理論

機構モデルは図4に示す1リンクモデルとする。姿勢角を微小として近似線形化を行うと、運動方程式は次式のようになる。

$$\left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b \right) \ddot{x}_b - m_b g x_b = -m_b l_b \ddot{X}_s + N_a \quad (5)$$

足関節モーメント N_a は状態遅延フィードバック制御(インナーループ)と支持面の加速度に応じた目標姿勢の調整(アウターループ)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。

$$\left. \begin{aligned} N_a(t) &= -K_p \{ \bar{x}_b(t - T_D) - \bar{x}_b(t - T_D) \} - K_D \dot{\bar{x}}_b(t - T_D) \\ T_R \ddot{\bar{x}}_b + \bar{x}_b &= G_R \ddot{X}_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

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_R は目標質量中心変位を決める1次フィルタの時定数、 G_R は同フィルタのゲインである。これらの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。

5. 伝達関数のフィッティングとパラメータ同定

式(5)、(6)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。図5に実験機B、実験機Aにおける周波数応答線図を示す。実験機Bでは質量中心変位の推定精度の確認としてMCで計測された質量中心変位と比較する。実験機Aについては加速度振幅一定と速度振幅一定の揺動から得られるデータを比較する。被験者1名分について、各実験により同定されたパラメータを

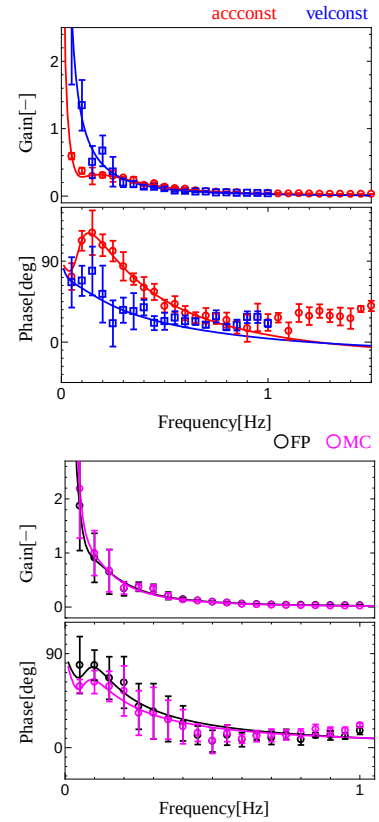


Fig. 5 Frequency response diagram

Table1 Balance control parameters identified from frequency response test

	A		B	
	Accconst	Velconst	Velconst	
	FP+IMU		FP+IMU	MC
K_p	613.6	520.9	534.3	523.6
K_D	196.1	149.8	104.4	83.9
T_D	0.154	0.154	0.077	0.046
T_R	1.87	0.22	1.98	2.134
G_R	0.045	0.027	0.04	0.0358

表1に示す。質量中心変位の推定精度は十分で、揺動幅の違いはインナーループには影響が少なく、アウターループには影響が大きいことが示された。また、速度振幅一定の波形は低周波帯域においてフィッティングの精度が低くなっていることから、アウターループに適切な制御則を追加することが必要と考えられる。

6. 結言

本研究では、矢状面立位バランスにおけるシステム同定の外部刺激による影響を調査し、異なる揺動幅において、周波数応答が低周波帯域で大きく変化することを示した。また、揺動幅の小さい揺動においてアウターループに適切な制御則を追加することでパラメータが同定できる可能性を示した。

文献

- (1) 成田和樹, 園部元康, 定常応答に基づく立位バランスモデルの構築と過渡応答への適用, 年次大会 2020, 一般社団法人, 日本機械学会,
- (2) 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,p22-2