

卒業論要旨

一定周波数揺動に基づく立位人体の重心高さと慣性モーメントの推定

Estimation method of the center of gravity and moment of inertia in standing based on constant frequency sway

システム工学群

動的デザイン研究室 1240162 柳生 稜介

1.1

2 緒言

立位のバランス評価法には圧力中心 (COP) 計測に基づく方法が広く用いられているが、重心位置を計測し、個人のバランス制御メカニズムを数学モデルとして同定できることが望ましい。これを実現するための条件の一つに、重心高さや慣性モーメント等の身体パラメータを予め調べておく必要がある。そのための方法として、密度を仮定したうえでカメラ計測による体積推定法⁽¹⁾が提案されているが、精度と時間の両方に課題がある。

身体パラメータを簡易かつ高精度に推定する手段として、人に何らかの運動をさせて、そのダイナミクスに基づくパラメータ推定が考えられる。また、同定されたパラメータのばらつきを防ぐためには、時間領域よりも周波数領域の議論が望ましい。モデルを単純化するためには、このとき引き起こす運動も単純であることが望ましい。過去の研究では、立位時の支持面を一定周波数で揺動すると、特に 0.7 Hz 以下の周波数では身体が一直線になる単一倒立振り子で表されることが示されている⁽²⁾。ただし、0.4 Hz を下回る低周波帯域では、応答が定常的でなくなり、周波数領域での議論が難しくなる可能性がある。

本研究の目的は、立位の支持面一定周波数揺動に対する人の定常応答解析から、被験者の重心高さと重心まわりの慣性モーメントを推定することである。計測は支持面の変位と足下のフォースプレートのみとする。揺動周波数は 0.5~0.6 Hz に設定し、応答の特徴から人体を単一倒立振り子モデルと仮定する。同定された身体パラメータの妥当性は、理論値との比較により評価する。

3 身体パラメータの推定法

重心高さと慣性モーメントを図 1 に示す 1 リンクモデルの運動方程式から推定する。矢状面水平前方を x 軸、鉛直上向きを y 軸とする。このモデルは、足部とそれ以外 (身体部) で構成され、足部は支持面に拘束され、身体部は足首まわりに回転する。身体部の回転角度を微小として近似線形化したうえで、並進と回転の運動方程式は次のようになる。

$$m_b \ddot{x}_b = -M \ddot{X}_s - R_x \quad (1)$$

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

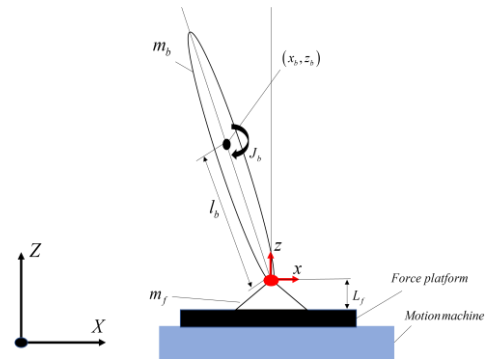


Fig. 1 Single inverted pendulum model

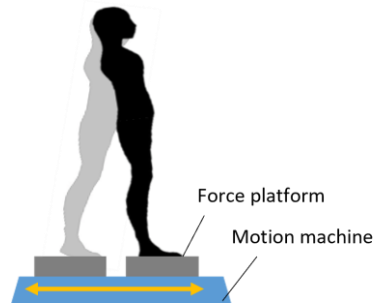


Fig. 2 Schematic diagram of constant frequency sway test

ここに、 x_b は質量中心変位 (支持面を原点とする移動座標系)、 x_p は圧力中心変位 (同上)、 X_s は支持面変位 (静止座標系)、 R_x は x 軸に関する水平床反力である。 M は被験者の体重、 m_b

は身体部の質量、 m_f は足部の質量、 J_b は身体部の重心まわりの慣性モーメント、 l_b は足関節から身体部重心までの長さ、 L_f は床面から足関節までの長さ、 l_f は床面から足部重心までの長さ、 g は重力加速度を表す。

このモデルの支持面を任意の角振動数 ω_k rad/s の一定周波数で揺動するとき、定常応答とみなして式(1)と式(2)を周波数領域に変換すると次式が得られる。

$$-\omega_k^2 m_b \tilde{x}_b = \omega_k^2 M \tilde{X}_s - \tilde{R}_x \quad (3)$$

$$\left\{ -\omega_k^2 \left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b \right) - m_b g \right\} \tilde{x}_b = \omega_k^2 \left\{ m_b l_b - m_f (L_f - l_f) \right\} \tilde{X}_s - Mg \tilde{x}_p + L_f \tilde{R}_x \quad (4)$$

ここに、 $\tilde{X}_s, \tilde{x}_b, \tilde{x}_p, \tilde{R}_x$ はそれぞれ支持面変位、重心変位、圧力中心変位、水平床反力を角振動数 ω_k の周波数領域に変換したときの複素係数を表す。式(3)と式(4)より $\tilde{x}_b$ を消去すると、次式が得られる。

$$\left\{ \omega_k^2 \left(\frac{MJ_b}{m_b l_b} + m_f (l_b + L_f - l_f) \right) + Mg \right\} \tilde{X}_s + Mg \tilde{x}_p - \left\{ \frac{J_b}{m_b l_b} + l_b + L_f + \frac{g}{\omega_k^2} \right\} \tilde{R}_x = 0 \quad (5)$$

式(5)において、複数の角振動数による実験を行い、計測された $\tilde{X}_s, \tilde{x}_b, \tilde{x}_p, \tilde{R}_x$ を代入した振動数別の複素数式を連立させることで、身体パラメータを導出する。ただし、本研究では過去の文献^{(3),(4)}から、 $m_f = 0.022M$, $L_f = 0.039H$, $l_f = 0.023H$ と置き、 l_b と J_b のみを未知パラメータとした。

4 検証実験

4.1 実験の概要

実験では前後に揺動が可能な揺動装置 (BASYS, テック技販) を使用し、被験者の応答は揺動面上に接地したフォースプレート (TF-3040, テック技販) でサンプリング周波数 100 Hz で計測した。揺動周波数は $f_1 = 0.50, f_2 = 0.55, f_3 = 0.60$ Hz の3種類とし、変位振幅は 30 mm で統一した。揺動波形は、図 3 に示すように 5 周期の振幅掃引後に 25 周期の振幅一定の振動を与えた後に再び振幅掃引を行って停止する。25 周期の振幅一定の区間の最初の 5 周期を除いた 20 周期で周波数解析を行った。

被験者は健康な男性被験者 3 名とする。被験者は揺動試験機上に素足で立ち、視線を前方にして両腕を自然に下した状態とした。実験はそれぞれの振動数で 3 回ずつ実施した。

4.2 計測データの処理とパラメータの導出

本実験より、支持面変位 X_s 、圧力中心 x_p 、水平床反力 R_x が計測される。このうち、 R_x に関して支持面が動くことによって生じる慣性力の影響を除去するために、以下の処理を行った $\tilde{R}_x$ を計測値とした。

$$\tilde{R}_x = R_x + 3.2\ddot{X}_s \quad (6)$$

式(6)の $\ddot{X}_s$ は、 X_s の数値微分により導出した。得られた周波数をフーリエ級数展開し、3つの周波数から得られた式(5)を連立させることで J_b, l_b を導出した。推定された慣性モーメントと重心高さの妥当性は、表 1 に示す文献^{(3),(4)}から得られる理論値 J_{b0}, l_{b0} との比較により検証した。

5 検証結果

被験者 3 名の同定結果を表 2 に示す。文献資料より重心位置は 54%-58% の位置にあるとされているが今回の結果では平均値が 46.9% とかなり小さく出ている。慣性モーメントについては比較する指標が無いので表 1 に記した身長と体重のみに基づいた身体パラメータと比較する。被験者 1 の結果をみると 1 回目と 2 回目について J_b は J_{b0} と近い値をとっていることからある程度の精度は得られている。重心高さや慣性モーメントは被験者の体格によって割合は変化するので、例えば表 2 の被験者 1 は重心高さが低い位置にある可能性は考えられる。

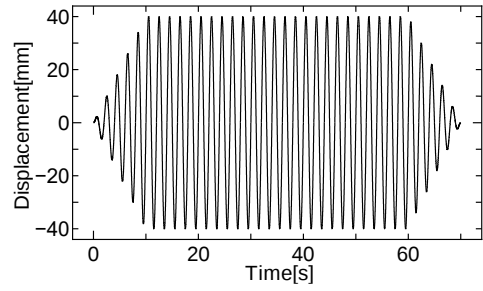


Fig. 3 Displacement of the support surface in constant frequency sway test

Table 1 Theoretical physical parameters obtained from the literature.

Symbol	Ratio
l_{b0}	$0.512H$
J_{b0}	$0.0455MH^2$

Table 2 Identified parameters of all subjects. The estimated value represent the mean and standard deviation of three tests. The values in brackets mean theoretical values obtained from the literature.

Subject	Height [cm]	Weight [kg]	l_b [mm]	J_b [kgm ²]
1	172	58.2	808 ± 26.5 (870)	6.88 ± 1.27 (7.80)
2	176	55.2	973 ± 34.3 (901)	17.3 ± 2.72 (7.26)
3	170	62.0	800 ± 25.6 (870)	6.86 ± 1.28 (8.16)

6 結言

本研究では被験者に対して揺動を加えることで重心高さや慣性モーメントをフォースプレートから簡易的に計測した。結果より正確な個人の身体パラメータを同定することができた。これより、立位時のバランス解析分野の研究の精度の向上が期待できる。

文献

- (1) Erdmann, W. S. and Kowalczyk, R., "A personalized method for estimating centre of mass location of the whole body based on differentiation of tissues of a multi-divided trunk", Journal of Biomechanics Vol.39, No.39 (2015), pp.65-72.
- (2) 園部元康, 井上喜雄, "一定周波数で揺動する台車上における立位バランス応答", 日本機械学会論文集, Vol.87, No.898 (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, Vol. 11 (1992), pp.23-33.
- (4) Contini, R., "Body segment parameters, Part II", Artificial limbs, Vol. 16, No. 1 (1972), pp. 1-19.