

卒業論文要旨

フォースプレート計測に基づく安静立位時のバランス評価法

Balance evaluation method based on the estimation of the COM

システム工学群

動的デザイン研究室 1200066 佐藤 悠斗

1 緒言

人の立位では身体が常に微小に揺れており、この摂動に基づくバランスの評価が広く用いられている。現在は、圧力中心 (COP) 計測に基づく評価⁽¹⁾が一般的であり、COP の軌跡長や面積で評価される。一方、人は重心の動揺を制御するために足関節トルクが生じ、その結果として COP が変化するため、COP よりも質量中心 (COM) の方が物理量としては直接的である。しかし、簡易な計測から COM の動きを補足することが難しいため、COM によるバランス評価は実用化されていない。

このような課題に対し、我々はフォースプレート計測から COM の変位と加速度を推定する手法を開発した。本研究では、推定した COM の情報に基づく新たな評価指標を提案する。COM を用いた評価の基準を明らかにするとともに、COP を用いた評価に対する優位性についても検証する。

2 フォースプレート計測に基づく COM 推定

フォースプレートを用いた COM 推定⁽²⁾ では、図 1 に示す人体を足部と足部以外 (以下、身体部) の 1 リンクモデルとして表現する。 x_b, y_b は矢状面と前額面の COM 変位である。フォースプレートの計測値として、 R_z は垂直力、矢状面と前額面のせん断力を R_x, R_y はそれぞれ矢状面と前額面のせん断力を表す。 x_p は足関節を原点とした圧力中心を、 N_x, N_y はモーメントをそれぞれ表す。身体パラメータとして、矢状面については、 m_f を足部質量、 m_b を身体部質量、 J_b を身体部質量中心まわりの慣性モーメント、 L_f を足関節の高さ、 l_f を足部質量中心の高さ、 l_b を足関節から身体部質量中心までの長さとし、 M を体重とする。前額面に関して、 m_l, m_p, m_u はそれぞれ脚部、骨盤、上半身の質量、 J_l, J_u はそれぞれ脚部と上

半身の重心まわりの x 軸慣性モーメント、 l_l は足関節から脚部質量中心までの長さ、 l_p は股関節から骨盤質量中心までの長さ、 l_u は腰部ジョイントから上半身質量中心までの長さ、 L_f, L_l, L_p はそれぞれ足部、脚部、骨盤部の長さを表す。

$$\ddot{x}_b = -\frac{R_x}{m_b} \quad (1)$$

$$\dot{x}_b = \frac{1}{m_b g} \left\{ \frac{J_b}{l_b} + m_b (L_f + l_b) \right\} \ddot{x}_b - N_x \quad (2)$$

$$\ddot{y}_b = -\frac{R_y}{m_b} \quad (3)$$

$$\dot{y}_b = \frac{1}{m_b g} \left\{ A \ddot{y}_b - (L_f + L_l + L_p) R_y - N_y \right\} \quad (4)$$

ここに、式(4)の係数 A は次のようになる。

$$A = \left\{ 2J_l + J_u + 2m_l l_l (l_l - L_l - L_p) + m_p L_l (l_p - L_p) + m_u l_u (L_l + l_u) \right\} / l_b \quad (5)$$

3 COM 推定に基づくバランス評価

3.1 バランス評価法

推定した COM からバランスを評価する。COM の加速度は、重力から体を倒す向きに働く重力モーメントと体を起こすために筋力から発生する復元モーメントの差によって生じる。そのため、COM 変位は体の揺れの変動を、COM 加速度は復元力の変動を表す。COM 変位と COM 加速度の変動が小さい場合にバランスが良いと考え、それらの実効値でバランスを評価する。ただし、COM 変位については、立位時の平衡位置 (原点) が明確に定まらない確率的な摂動の影響を除去するために、通過周波数 0.1Hz のハイパスフィルタを施したデータを用いて評価する。

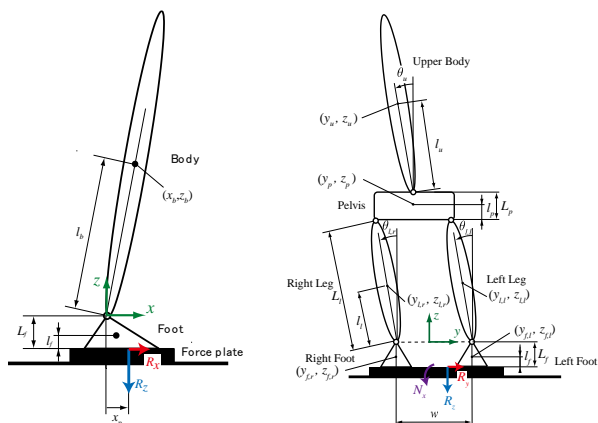
3.2 データの取得

計測は、フォースプレート上に立ち、開眼、閉眼をそれぞれ 40 秒間の計測を行った。被験者は両手を自然に下ろし、顔を前方に向けたまま視野を水平に広く保つように指示した。対象者は若年健常者 100 名、高齢者 21 名とし、3 回ずつ計測を行った。ただし、高齢者は開眼のみの計測である。

3.3 評価指標の構築

矢状面と前額面に関して、それぞれ COM 変位と COM 加速度の実効値が得られる。各実効値に対して、バランスの良し悪しを判断する基準が必要となる。そこで、若年健常者 100 名の計測データから各評価値に対してヒストグラムを作成した。矢状面に関するヒストグラムを図 2 に示す。

このヒストグラムを適切な分布で近似し、その累積分布関数を基準としてバランスを評価する。ヒストグラムに適合する累積分布として、次式のガンマ関数分布で近似した。



(a) Sagittal plane (b) Lateral plane

Fig. 1 Analytical models for COM estimation from a force plate measurement

$$p_s = \left\{ \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} (\gamma x + \delta)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\gamma x + \delta}{\beta}\right) \right\} \quad (6)$$

ここに、 $\Gamma(\alpha)$ はガンマ関数であり、 x はCOM変位やCOM加速度の実効値に対応する。係数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は、ヒストグラムに一致するように最小二乗法によって求めた。

3.4 より詳細な評価法

3.4.1 概要

3.3章で作成した評価基準を用いてより詳細にバランス評価を行うため、周波数解析と1次関数近似による勾配とばらつきによる評価を行った。若年健常者の比較対象として高齢者のデータを用いた。

3.4.2 周波数解析

被験者ごとに3回分の実験データの平均を取り、フーリエ変換を行い、横軸に周波数、縦軸に $x_b, a_{x_b}, y_b, a_{y_b}$ のグラフを作成した。そのグラフからピーク時の周波数を確認し、若年健常者と高齢者それぞれで平均を取った。図3は若年健常者と高齢者の1名ずつの x_b の周波数解析である。また表1は $x_b, a_{x_b}, y_b, a_{y_b}$ のピーク時の周波数の平均を示す。結果は若年健常者と高齢者では大きな差はみられなかった。

3.4.3 1次関数近似による勾配とばらつきの評価

1次関数近似による勾配とばらつきの評価を図4と表2に示す。近似を行う範囲をCOM変位が1.2倍以上の場合とし、図4の黒点に示すように、被験者ごとに実験3回分のデータからCOM推定に基づく評価を行った。その後、図4の赤線

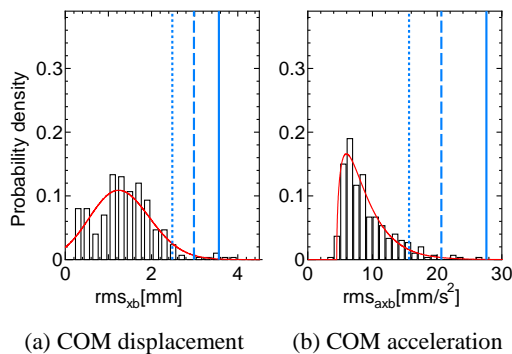


Fig. 2 Histogram of COM displacement and COM acceleration of a hundred healthy young subjects. (Sagittal plane)

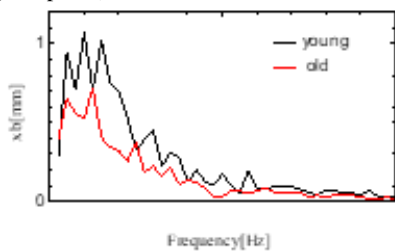


Fig.3 Analytical of Frequency
Table 1 Analytical of Frequency

	x_b	a_{x_b}	y_b	a_{y_b}
Frequency_young [Hz]	0.439	0.193	0.495	0.254
Frequency_old [Hz]	0.424	0.164	0.487	0.262

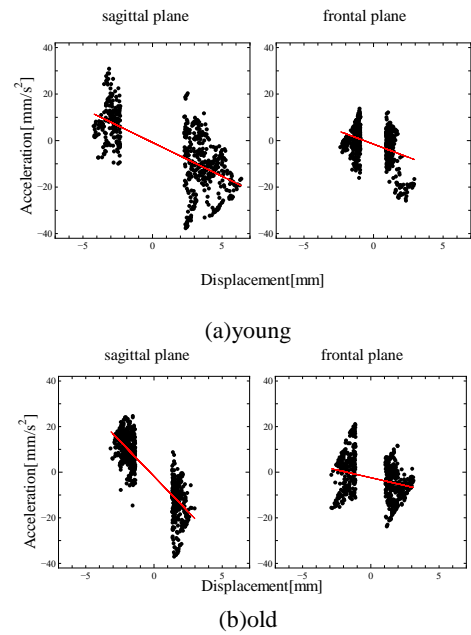


Fig.4 Evaluation of gradient and stdev by linear function approximation

Table 2 Gradient of average and stdev of average

	Gradient of average [-]		Stdev of average [mm/s ²]	
	young	old	young	old
Sagittal plane	-1.67	-3.98	13.49	15.18
Frontal plane	-1.57	-2.58	9.35	9.93

に示すように、プロット点に対して1次関数近似を行い、勾配による評価とした。近似線に対するプロット点の標準偏差をとり、ばらつきによる評価とした。表2は、若年健常者と高齢者それぞれの勾配による評価とばらつきによる評価の平均である。勾配が大きいほど、復元力が大きく、ばらつきが小さいほど、復元力の値が一定であると考えられる。表2より、高齢者の方が復元力は大きい、その復元力の値は不安定であると言える。

4 特異な条件下でのバランス評価のバランス評価

バランス評価手法の有効性を検証するために、特殊な条件下における若年健常者の安静立位実験を行った。COP評価との違いを示すために、COM変位またはCOM加速度を増加する条件として、冷却暴露実験と股関節拘束実験を実施した。バランス評価はすべて安静立位40秒で行った。

4.1 冷却暴露実験

冷却暴露によりCOM変位が増加することが報告されているため⁽³⁾、被験者2名に対して冷却前後のバランス評価を行った。安静立位実験を3回行った後に、氷水によりふくらはぎより下を20分間冷却し、1分おきに安静立位実験を10回行った。被験者1名のCOM加速度のバランス評価を図5に示す。冷却後3回分の結果に違いがみられたため、冷却前3回の平均を黒点し、冷却前を黒点、冷却後3分間の結果を赤点で示す。表3,4は、同実験におけるCOP評価で、図5では、COM変位が増加していることを確認できるが、表3,4では規則性は見当たらなかった。

4.2 股関節拘束実験

股関節を拘束することで、足関節でバランスをとり、COM 加速度が増加するという理論をたて、その理論に基づいてフォースプレートを用いて安静立位の実験を被験者 7 名で行った。開眼時の安静立位実験を拘束なしと拘束ありをそれぞれ 3 回ずつ行った。図 6 と表 5 は、被験者 1 名分の解析結果である。図 6 は、拘束ありと拘束なしの COM 推定に基づいたバランス評価での解析結果で、拘束なしが黒点、拘束ありが赤点で、それぞれ実験 3 回の平均を示している。表 5 は拘束なしと拘束ありの COP 評価である。全被験者が拘束することにより COM 加速度が増加していることが確認できたが、COP 評価には規則性がみられなかった。

5 結言

本研究では、COP 評価に代わる評価指標を提案した。それに合わせて、評価基準の作成と COP 評価に対する優位性の検証を目的とした。若年健康者 100 名を対象とした安静立位実験から統計的な確率を求めて評価の基準とすることができた。また、特殊な条件下でそれぞれのバランス評価を比較することで COP 計測による評価より、COM 推定に基づいたバランス評価の方が正確にバランスを評価できていることを確認した。

参考文献

- (1) 終幸伸, 支持基底面積と重心移動域の実測とその比較, 23 (3) : 2008
- (2) 園部元康, 井上喜雄, フォースプレート計測に基づく立位時の矢状面質量中心推定 (推定誤差の発生メカニズムと推定精度の評価), 85-877, 2019.
- (3) 崎田正博, 高柳清美, 中山彰一, 花田穂積, 熊谷秋三, 膝下冷却が動的立位姿勢制御に及ぼす影響, 理学療法科学 21 (1) : 17-23 2006

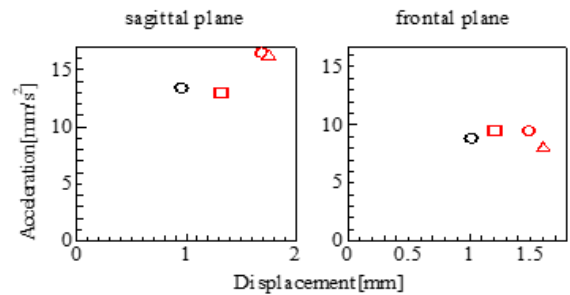


Fig.5 Balance evaluation before and after cooling tests

Table 3 Balance evaluation based on COP index (before cooling)

Number	Trajectory length (mm)	Area (mm ²)	STD in AP (mm)	STD in ML (mm)
1	257.7	137.0	6.143	1.809
2	217.7	82.24	3.987	1.642
3	249.9	171.7	6.962	1.966

Table 4 Balance evaluation based on COP index (after cooling)

Number	Trajectory length (mm)	Area (mm ²)	STD in AP (mm)	STD in ML (mm)
1	314.3	123.9	5.008	1.972
2	367.3	72.13	2.980	1.951
3	363.9	104.9	3.626	2.302

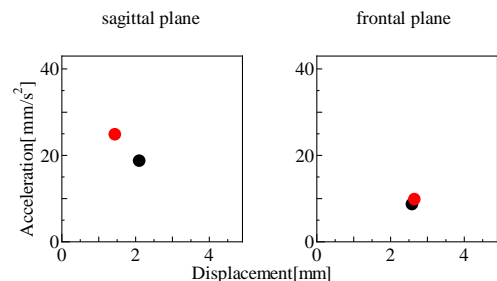


Fig.6 Evaluation of COM

	Evaluation of COP			
	Trajectory length (mm)	Area (mm ²)	STD in AP (mm)	STD in ML (mm)
Under constraint	237.4	66.22	5.711	0.958
Without constraint	194.5	80.98	5.71	0.95