

フォースプレートと頭部慣性センサ計測に基づくバランス評価

高知工科大学 園部作成

本資料では、6軸の足裏フォースプレートと頭部慣性センサを組み合わせた計測装置を使用し、その計測値から推定した重心（COM）変位や頭部の加速度・角速度のデータからどのようにバランス能力を評価するのかを説明する。

1 測定できるデータ（推定値）

本計測システムから、以下の推定値が得られる。座標軸として、x軸を水平前方、y軸を水平左手方向、z軸を鉛直上向きと定義する。

1. 圧力中心（COP） (x_p, y_p)
2. COM 水平変位 (x_b, y_b)
3. COM 水平加速度 (\ddot{x}_b, \ddot{y}_b)
4. 頭部の水平加速度 $(\ddot{x}_{hd}, \ddot{y}_{hd})$
5. 下半身の重心加速度 (\ddot{x}_1, \ddot{y}_1) と上半身の重心加速度 (\ddot{x}_2, \ddot{y}_2)
6. 足関節戦略に起因する頭部加速度 $(\ddot{\xi}_{x1}, \ddot{\xi}_{y1})$ と股関節戦略に起因する頭部加速度 $(\ddot{\xi}_{x2}, \ddot{\xi}_{y2})$

古典的な COP だけでなく、COM 変位、COM 加速度、頭部加速度、関節戦略頭部加速度など、多くの情報が得られる点が本計測法の利点となる。

2 評価指標

これらのデータをもとに計算した具体的な評価指標を次ページの表 1 に示す。

略語の説明

- AP：Anterior-posterior（前後方向）
- ML：Medial-lateral（内外方向＝左右方向）
- COP：Center of pressure（圧力中心，足圧中心）
- COM：Center of mass（質量中心，重心）
- RMS：Root mean square（二乗平均平方根）

表1 バランス評価指標一覧

評価変数名	単位	説明	
1	RMSCP _{AP}	mm	前後方向の COP の RMS
2	RMSCP _{ML}	mm	左右方向の COP の RMS
3	S95CP	mm ²	COP の 95%信頼楕円面積
4	VELCP	mm/s	COP 軌跡速度
5	RMSCM _{AP}	mm	前後方向の COM 変位の RMS
6	RMSCM _{ML}	mm	左右方向の COM 変位の RMS
7	RMSCMA _{AP}	mm/s ²	前後方向の COM 加速度の RMS
8	RMSCMA _{ML}	mm/s ²	左右方向の COM 加速度の RMS
9	RMSHA _{AP}	mm/s ²	前後方向の頭部加速度の RMS
10	RMSHA _{ML}	mm/s ²	左右方向の頭部加速度の RMS
11	RMSHW _{AP}	deg/s	頭部のピッチ運動（前後）の角速度の RMS
12	RMSHW _{ML}	deg/s	頭部のロール運動（左右）の角速度の RMS
13	S95CM	mm ²	COM の 95%信頼楕円面積
14	VELCM	mm/s	COM 軌跡速度
15	AVGHA	mm/s ²	頭部平均加速度
16	SR	-	AVGHA/S95CM
17	RMSCMH _{AP}	mm	前後方向の COM 変位の 0.15 Hz 以上の成分
18	RMSCMH _{ML}	mm	左右方向の COM 変位の 0.15 Hz 以上の成分
19	VELCMH	mm/s	COM の 0.10Hz 以上の成分の軌跡速度
20	RMSCML _{AP}	mm	前後方向の COM 変位の 0.15 Hz 以下の成分
21	RMSCML _{ML}	mm	左右方向の COM 変位の 0.15 Hz 以下の成分
22	VELCML	mm/s	COM の 0.10Hz 以下の成分の軌跡速度
23	GRAD _{AP}	-	前後方向の COM 変位と COM 加速度の近似直線の傾き
24	GRAD _{ML}	-	左右方向の COM 変位と COM 加速度の近似直線の傾き
25	IC _{AP}	mm/s ²	前後方向の近似直線の切片
26	IC _{ML}	mm/s ²	左右方向の近似直線の切片
27	SIG _{AP}	mm/s ²	前後方向の近似直線からの加速度の標準偏差
28	SIG _{ML}	mm/s ²	左右方向の近似直線からの加速度の標準偏差
29	CC _{AP}	-	前後方向の COM 変位と COM 加速度の相関係数
30	CC _{ML}	-	左右方向の COM 変位と COM 加速度の相関係数
31	RMSXI1 _{AP}	mm/s ²	前後方向の足関節戦略に起因する頭部加速度の RMS
32	RMSXI1 _{ML}	mm/s ²	左右方向の足関節戦略に起因する頭部加速度の RMS
33	RMSXI2 _{AP}	mm/s ²	前後方向の股関節戦略に起因する頭部加速度の RMS
34	RMSXI2 _{ML}	mm/s ²	左右方向の股関節戦略に起因する頭部加速度の RMS
35	RXI _{AP}	-	前後方向の 2 つの関節戦略の比 (RMSXI2 _{AP} /RMSXI1 _{AP})
36	RXI _{ML}	-	左右方向の 2 つの関節戦略の比 (RMSXI2 _{AP} /RMSXI1 _{AP})
37	CXI _{AP}	-	前後方向の足関節戦略頭部加速度と股関節戦略頭部加速度の相関係数
38	CXI _{ML}	-	左右方向の足関節戦略頭部加速度と股関節戦略頭部加速度の相関係数

3 評価指標の意味

様々な物理量が得られる本手法の利点を活かすことで、以下のような評価が可能になる。

(a) COMの加速度が生じる要因の切り分け

まず、足関節トルクとCOM加速度の関係を説明する。COMの位置が平衡点から逸脱すると、それを戻すための復元力（抗重力モーメント）が作用する。一方、身体には重力が一定の大ききで作用しており、COMの逸脱の大ききに応じて「うでの長さ」が変わるため、重力に起因する力のモーメントが変化する（図1）。このとき、以下の関係が成り立つ。

$$(\text{身体に作用する力のモーメント}) = (\text{復元トルク}) - (\text{重力トルク})$$

この式の右辺第1項は主としてCOPに比例し、右辺第2項はCOM変位に比例する。これが、「COP-COM」がバランス解析における重要な指標となる理由である。我々が評価したいのは、

「COM変位」に応じて、どの程度の「復元力」が生じているか

である。しかし、「復元トルク」は明確な定義が難しい物理量であり、加えて「重力トルク」の影響も考慮する必要がある。そこで、「身体に作用する力のモーメント」がCOM加速度に比例することを考慮して、以下では

「COM変位」に応じてどの程度の「COM加速度」が生じているか

に置き換えて、評価をする。

次に、COM加速度がCOMの復元のために生じたのか、それ以外の要因で生じたのかを切り分けたい。そのために、30秒程度の計測区間におけるCOM変位とCOM加速度の関係を平面にプロットして、それを直線近似する（図2）。このグラフを矢状面と前額面に対してそれぞれ描き、以下のように評価する。

- 近似直線（赤線）の傾きを $GRAD_{AP}$, $GRAD_{ML}$ とし、復元力の強さを表す。通常は負の傾きになるが、傾きが急であるほど復元が強いことを意味する。
- 近似直線からみたCOM加速度の標準偏差（赤線に対する青破線の幅）を SIG_{AP} , SIG_{ML} とし、力のばらつきを表す。GRADは復元力に起因するが、SIGは無意味な力のばらつきと解釈する。十分な力制御ができない場合や、前庭耳石器のフィードバックが弱い場合は、SIGが大きくなる。
- 直線の切片を IC_{AP} , IC_{ML} とする。これは復元の非対称性を意味しており、0に近ければ前後あるいは左右の応答が対称、正や負の絶対値が大きければ非対称性が強いことになる。

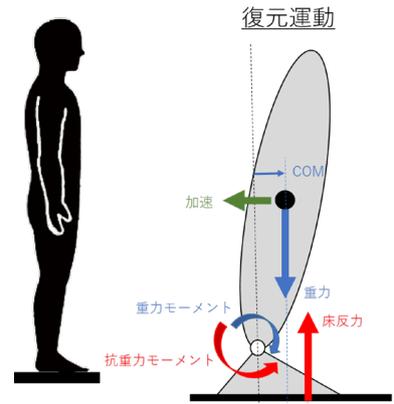


図1 COM加速度の意義

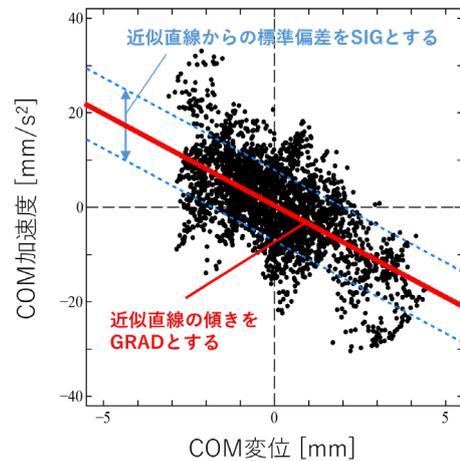


図2 COM変位と加速度のプロット

(b) 周波数による切り分け

COM 変位のゆっくりとした変動が生じる理由として、以下の2つの解釈がある。

- (1) 無意味な平衡点の変動（ランブリング）
- (2) 制御の ON/OFF（間欠制御）

本システムでは(1)の解釈を採用し、0.15 Hz 以下の低い周波数での変動は、ランブリングと解釈する⁽¹⁾。

図3は、計測された左右方向のCOM変位（黒）を周波数で切り分けた場合の結果である。赤線は0.15 Hz以上の成分のCOM変位であり、これはCOM変位にハイパスフィルタをかけることで得られる。青線は黒線と赤線の差から得られた波形で、0.15 Hz以下の成分に相当する。この赤線のRMSを復元動作から生じた意味のある重心揺動（ $RMS_{CMH_{AP}}$, $RMS_{CMH_{ML}}$ ）として評価し、青線のRMSをCOMの平衡点の確率的な変動によって生じた重心動揺（ $RMS_{CML_{AP}}$, $RMS_{CML_{ML}}$ ）として評価する。

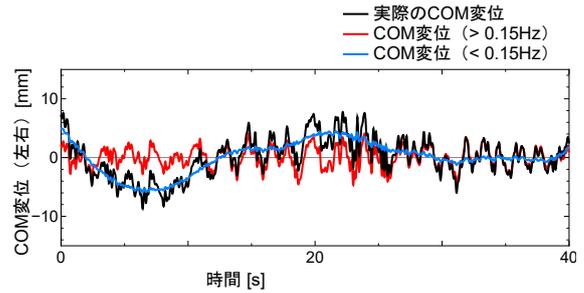


図3 周波数によるCOM変位の切り分け

(c) 足関節戦略と股関節戦略の評価

本手法では、頭部加速度を基準として、身体が一直線に動く足関節戦略モード（モード1）から生じた頭部加速度（ $\ddot{\xi}_{x1}, \ddot{\xi}_{y1}$ ）と、股関節トルクのみが作用して足関節トルクがフリーのときの運動を股関節戦略モード（モード2）から生じた頭部加速度（ $\ddot{\xi}_{x2}, \ddot{\xi}_{y2}$ ）が得られる。本手法では、この2つの関節戦略の大きさや、それらの相関係数を評価できる。

$RMS_{X1_{AP}}$, $RMS_{X1_{ML}}$: 足関節制御戦略によって生じた頭部加速度のRMS

$RMS_{X2_{AP}}$, $RMS_{X2_{ML}}$: 股関節制御戦略によって生じた頭部加速度のRMS

RX_{AP} , RX_{ML} : 足関節戦略と股関節戦略の大きさの比（大きいほど股関節戦略の割合が高い）

CX_{AP} , CX_{ML} : 矢状面と前額面における2つの関節戦略頭部加速度の間の相関係数。

この相関係数は股関節戦略のはたらきを意味し、負の相関であれば頭部加速度の抑制、負の相関であれば重心の制御として股関節戦略が作用することを意味する。

これらの手法を用いて評価した研究として、ノイズ前庭刺激（nGVS）を付加した場合のバランス評価を行った事例を報告している^(2,3)。

参考文献

- (1) Zatsiorsky VM, Duarte M. Rambling and trembling in quiet standing. *Motor Control*. 2000;4(2):185–200.
- (2) Sonobe M, Mitsutake T. Properties of standing balance control under noisy galvanic vestibular stimulation. *Front Neurol*. 2025;Volume 16.
- (3) Mitsutake T, Sonobe M. Effects of different noisy galvanic vestibular stimulation frequencies on postural control responses. *Neuroscience*. 2026;597:106–12.