

バランス戦略に対する圧力中心フィードバックの介入効果

システム工学群

動的デザイン研究室 高田 直人

1. 緒言

ヒトの立位姿勢の制御には、体性感覚、視覚、および前庭感覚の統合が必要であるが、高齢者や慢性めまい患者では前庭感覚の相対的な重みが低下することが報告されている⁽¹⁾。こうした感覚器の重みづけを調節する方法としてリハビリテーション機器の介入が活用されつつあるが、改善効果の定量評価が難しいことや、効果のメカニズムが解明されておらず、どのような症状の患者に効果的であるかが明らかになっていないという課題がある。

リハビリ機器の介入の一例として、株式会社テック技販製の重心フィードバック搭載型重心動揺計 (BASYS) がある。BASYS には、足裏の圧力中心 (COP) の動きに応じて支持面が揺動する COP フィードバックが存在する。先行研究より、同機器の介入を行うことで COP 変動の減少や重心の前方推移⁽²⁾が報告されており、姿勢制御やバランス反応が変化する可能性が示唆されている。

我々の先行研究では、フォースプレート (FP) および頭部の慣性センサ (IMU) 計測により、力学的観点に基づいた立位姿勢のバランス評価が行われてきた⁽³⁾。これにより重心変位や上半身と下半身の重心加速度を推定することができ、さらに足関節戦略および股関節戦略といった関節戦略の寄与を定量的に評価できる。

本研究の目的は、COP フィードバックを介入と位置づけ、我々の動学的なバランス評価法を適用し、介入の効果を明らかにすることである。さらに、介入効果には個人差が生じる可能性があることから、効果の有無に対してグループ分けを行い、介入効果の要因についても検討する。

2. COP フィードバックによる介入効果の検証

2.1 実験概要

COP フィードバックには、図 1 (a) に示すように COP の移動方向と同方向に床面をリアルタイムで変動させる In-phase Mode が存在する。介入効果を検証するために 20 代の被験者 30 名を対象に立位実験を実施した。実験では、60 秒間の In-phase Mode による COP フィードバックの介入を行い、その前後で安静立位計測を各 35 秒間実施した。実験はすべて開眼条件で行い、床面の変位量は COP 変位量に対して 15% に設定した。

計測には、図 1 (b) に示すように FP (TF-3040-C、テック技販) と 2 つの IMU (IMS-WD、テック技販) を使用した。FP では足裏に作用する 3 軸の床反力と床反力モーメントを計測した。IMU は後頭部および床面に設置し、3 軸の加速度と角速度を計測した。後頭部に取り付けた IMU は、姿勢角推定を行い、センサ座標系から静止座標系に変換した。また、すべての計測データのサンプリング周波数は 100 Hz に設定した。

解析のために、座標軸として静止座標系 o -xyz を定義した。x 軸は水平前方向、y 軸は水平左手方向、z 軸は鉛直上方向を正とする。

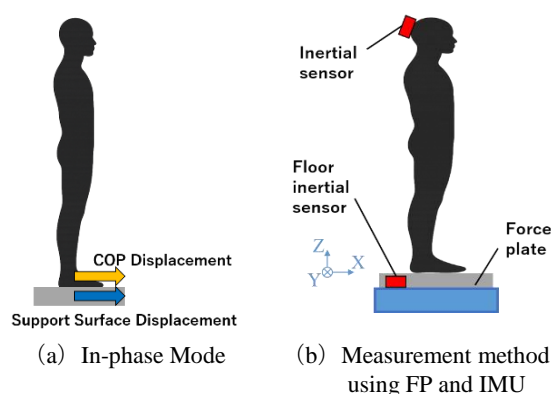


Fig. 1 Schematic diagram of the intervention and measurement method.

2.2 評価方法

FP と IMU の計測データから両脚立位のバランス評価に必要な重心を推定する。ヒトの身体を簡易的に表現した矢状面および前額面の 2 つの剛体モデルと身体パラメータをベースに身体部の重心 (COM) 変位、COM 加速度、下半身および上半身の COM 加速度を推定する。さらに本研究では、安静立位時の評価指標の 1 つとして関節戦略の概念を用いる。重心推定により得られた下半身および上半身の COM 加速度の比率から、姿勢制御において足関節トルクを主とする足関節戦略および股関節トルクを主とする股関節戦略の貢献度を推定することができる。これらの寄与は、頭部加速度を基準として足関節戦略および股関節戦略に起因する頭部加速度を算出する。

得られた物理変数を用いて導出した複数のバランス評価指標を表 1 に示す。これらのバランス評価指標は、重心と頭部加速度の揺れの大きさに関する指標、重心制御に関する指標、頭部加速度制御に関する指標の 3 つに大別される。添え字 AP は矢状面、ML は前額面を示す指標である。重心と頭部加速度の揺れの大きさに関する指標は、COM 変位 (RMSCM)、COM 加速度 (RMSCMA)、COM 変位の 95% 信頼楕円面積 (S95CM)、頭部加速度 (RMSHA)、頭部平均加速度 (AVGHA) である。重心制御に関する指標は、図 2 に示すように COM 加速度を縦軸、COM 変位を横軸にプロットした分布に対する近似直線の傾き (GRAD)、同近似直線に対する COM 加速度の標準偏差 (SIG) である。ここで、GRAD は重心動揺に対する復元の強さ、SIG は制御力のばらつきを意味する。頭部加速度制御に関する指標は、足関節戦略によって生じる頭部加速度 (RMSX11)、股関節戦略によって生じる頭部加速度 (RMSX12)、足関節戦略によって生じる頭部加速度と股関節戦略によって生じる頭部加速度の比 (RXI) である。これらの評価指標に基づき COP フィードバックの介入前後の安静立位においてバランスの変化を評価する。

Table 1 Balance evaluation indices in quiet standing

Index	unit	description
Sway index for COM and head acceleration		
$RMSCM_{AP}$	mm	Root mean square of COM displacement on each plane
$RMSCM_{ML}$	mm	Root mean square of COM displacement on each plane
$RMSCMA_{AP}$	mm/s^2	Root mean square of COM acceleration on each plane
$RMSCMA_{ML}$	mm/s^2	Root mean square of COM acceleration on each plane
$S95CM$	mm^2	95% confidence ellipse area of COM
$RMSHA_{AP}$	mm/s^2	Root mean square of head acceleration on each plane
$RMSHA_{ML}$	mm/s^2	Root mean square of head acceleration on each plane
$AVGHA$	mm/s^2	Mean head acceleration
Index for COM control		
$GRAD_{AP}$	-	The gradient of linear approximation between COM displacement on each plane
$GRAD_{ML}$	-	
SIG_{AP}	mm/s^2	Standard deviation of COM acceleration from linear approximation on each plane
SIG_{ML}		
Index for head acceleration control		
$RMSXI1_{AP}$	mm/s^2	Root mean square of head acceleration caused by ankle strategy on each plane
$RMSXI1_{ML}$		
$RMSXI2_{AP}$	mm/s^2	Root mean square of head acceleration caused by hip strategy on each plane
$RMSXI2_{ML}$		
RXI_{AP}	-	$XI_{AP} = RMSXI2_{AP} / RMSXI1_{AP}$
RXI_{ML}	-	$XI_{ML} = RMSXI2_{ML} / RMSXI1_{ML}$

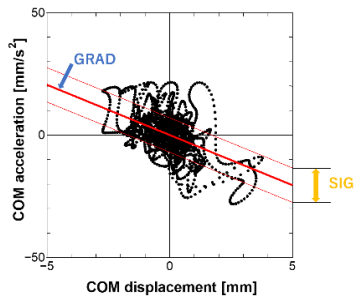


Fig. 2 Slope (GRAD) and standard deviation (SIG) of the linear fit between COM displacement and acceleration.

また、In-phase の介入効果として「支持面の動きによるサポートにより立ち直りが弱くなり、介入後に COM 加速度が減少する」という仮説を立て、被験者を COM 加速度を基準にグループ分けを行う。介入前後で矢状面の COM 加速度 ($RMSCMA_{AP}$) が減少した被験者を G1 (効果群)、増加した被験者を G2 (非効果群) とし、両グループの介入前におけるバランス評価指標の有意差をウィルコクソンの順位和検定により調べた。統計的有意差は 5% とした。

3. 結果

図 3 にグループ分けの結果を示す。G1 が 19 名、G2 が 8 名となった。図 4 に主要な評価指標の介入前における各グループの平均値と標準偏差を示す。重心の揺れの大きさの指標では、グループ分けの基準である矢状面の COM 加速度 ($RMSCMA_{AP}$) は G1 が G2 より大きいことが分かる。また、重心制御に関する指標では、重心動揺に対する復元の強さ ($GRAD_{AP}$) および制御力のばらつき (SIG_{AP}) も G1 のほうが大きいことが分かる。G1 の重心制御のばらつきが増大したことが COM 加速度の増大の要因と考えられる。このことから、G1 では元々重心制御が不安定で、バランス制御が十

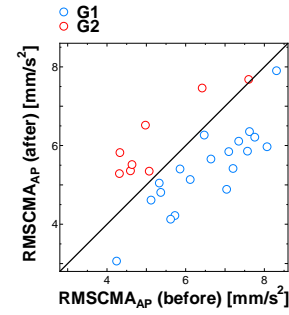


Fig. 3 Distribution of sagittal plane center of mass acceleration ($RMSCMA_{AP}$) for subjects before and after the intervention

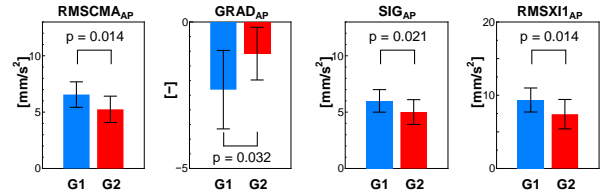


Fig. 4 Mean and standard deviation of the balance evaluation indices during quiet standing before the intervention in G1 and G2.

分に行われていない可能性が考えられる。頭部加速度制御に関する指標においては、足関節戦略に起因する頭部加速度 ($RMSXI1_{AP}$) が G1 は G2 より大きいことから G1 の被験者は元々足関節戦略を重視してバランスをとっていた可能性が考えられる。

以上の結果から、In-phase の介入後に COM 加速度が減少した効果群は、介入前には足関節戦略を主とした姿勢制御が行われていた結果、特に矢状面の制御力のばらつきが大きく、重心加速度が増大していたと考えられる。介入後には、このばらつきが低減し、重心制御がより安定した姿勢戦略に移行した可能性が示唆される。よって In-phase の介入は、足関節戦略への依存が大きく重心制御が不安定な被験者に対して姿勢制御を安定化させる効果を有する可能性が考えられる。

4. 結言

本研究では、COP フィードバックの介入効果を明らかにすることを目的とした。結果として、In-phase 条件での COM 加速度に基づく分類において、効果群では介入前に COM 加速度が大きく、矢状面の制御力にばらつきがある被験者が多く含まれ、足関節戦略の寄与が高いことが確認された。これにより、In-phase の介入によって、従来は足関節戦略に依存していた制御が改善され、重心制御の向上につながった可能性が示唆された。一方で、本研究では安静立位時のみを評価対象としており、介入中の姿勢制御の変化は明らかにできていない。介入中の姿勢制御を評価可能な指標を導入し、COP フィードバックの影響をより詳細に検討する必要がある。

文献

- (1) Alberts BBGT, Selen LPJ, Medendorp WP. Age-related reweighting of visual and vestibular cues for vertical perception. *J Neurophysiol.* 2019.
- (2) 菅沼惇一, 橋本宏二郎, 足立淳二, 奥埜博之, 河島則天. 高齢者の立位姿勢に対する重心動揺リアルタイムフィードバックの介入効果. 第 51 回日本理学療法学会大会抄録集. 2016.
- (3) Sonobe and Mitsutake Properties of Standing Balance Control under Noisy Galvanic Vestibular Stimulation, *Frontiers in Neurology*, Vol. 16, 2025.