

修士論文要旨

重心フィードバック搭載型重心動揺計によるバランス改善メカニズム

Balance improvement mechanism through a stabilometer installing center of gravity feedback system.

知能機械システム工学コース

動的デザイン研究室 1225045 梶垣 樹

1. 緒言

病気や老化による身体の衰えによって立位や歩行が困難な患者に対して、機械を利用したリハビリテーションが活用されている。このようなリハビリ機器の適用によって改善の事例が報告されているが、課題として改善の定量的な評価が難しいことや、個々の患者の症状に対する機器の最適な設定方法が確立されていないことなどがある。

本研究では、バランスの定量的な評価を行う手段として、フォースプレート計測に基づく安静立位のバランス評価法⁽¹⁾を適用する。これはフォースプレートから質量中心 (COM) 変位と加速度を推定し、その振動の大きさを評価する手法である。本研究では、本手法を重心フィードバック搭載型重心動揺計の効果の検証に適用した結果を報告する。

重心フィードバック搭載型重心動揺計はロボットリハビリ装置の一つであるが、同機器適用前後の安静立位のバランスを比較する。この結果によりバランスが改善した被験者についてより詳細な検討を行い、改善要因を明らかにする。

2. フォースプレートによるバランス評価

2.1 フォースプレートを用いた COM 推定

本研究では人体を図2に示すような1リンクモデルと仮定した際の COM 変位と加速度をフォースプレートより推定しバランス評価を行う。重心フィードバック搭載型重心動揺計は矢状面方向に対して効果を発揮するため、フォースプレートから計測されたせん断力 (R_x) とモーメント (N_y) より矢状面方向の COM 変位と加速度を推定する。安静立位時の COM 変位と加速度の推定式は先行研究より以下で求める⁽²⁾。

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

$$\tilde{x}_b = \frac{1}{m_b g} \left[-\left(\frac{J_b}{m_b l_b} + L_f + l_b \right) R_x + N_y \right] \quad (2)$$

ここに、 m_b は身体部の質量、 J_b は身体部質量中心まわりの慣性モーメント、 l_b は足関節から身体部質量中心までの距離、 L_f は足関節高さである。式(1)と式(2)ではこれらの値を身長・体重比より計算したが、その内容については文献⁽¹⁾に記載してあるため、ここでは割愛する。

2.2 バランス評価法

COM の変位と加速度の大きさ定量化するために、バランス評価では COM 変位と加速度の標準偏差を求めた。COM 加速度は重力モーメントと筋力による復元モーメントの差によって生じるため、復元力を反映した物理量と位置付けられる。

本バランス評価法では、小さな復元力で重心を一定位置に

キープできる状態が効率よくバランスが取れていると考え、COM 変位と COM 加速度の値が小さいほどバランスが良いと定義する。ただし、COM 変位は原点 (平衡位置) がゆっくりと変化する特徴があるが、これは確率的な挙動であり、バランスの効率とは関係しないと考えた。そこで、原点の変動を評価から除くために、COM 変位にカットオフ周波数 0.1Hz のハイパスフィルタを通したうえで標準偏差を求めた。

本評価指標は、変位と力の大きさのみによる評価であり、変位と力の相関関係は評価しないラフな指標である。一方で、シンプルで分かりやすい評価指標であるため、患者などの被験者も理解しやすい。このような評価指標により、ロボットリハビリなどの介入による効果が検証できる。

3. 機器を用いたバランス評価実験

3.1 重心フィードバック搭載型重心動揺計

本研究では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を対象にバランス評価を行う。同機器には測定板の下に4個のロードセルを搭載しており、それによって圧力中心 (COP) を計測する。また、床面の変位制御システムを有しており、COP と同じ方向に床面をリアルタイムで移動させる In-Phase Mode と COP と逆方向に床面を移動させる Anti-Phase Mode の2つの機能が搭載されている。床面プレートの移動量は COP の移動量の 5、10、15% の3種類の設定が可能である。同機器によって高齢者や股関節疾患患者の圧力中心変動の低減や重心の前方推移が報告されている⁽³⁾。

3.2 実験方法

重心フィードバック搭載型重心動揺計によるバランス変遷を確認するための検証実験を行う。20代の健常者9名に対して、初めに35秒の静止立位の計測を3回行った。その後同機器による In-Phase Mode (10%) による介入を行い、直後に静止立位の計測を1回行う。ハイパスフィルタの影響を除くために解析区間は計測区間の両端5秒間を除く25秒間

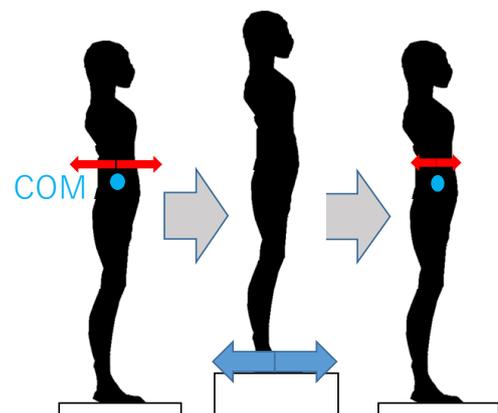


Fig. 1 Schematic diagram of the balance evaluation test.

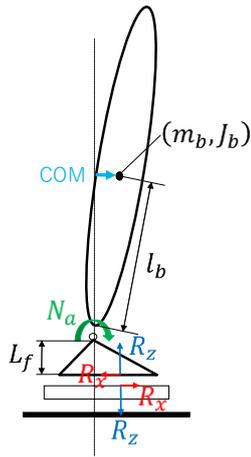


Fig. 2 Single-link model on sagittal plane.

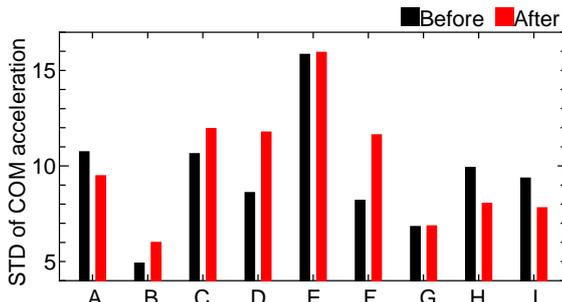


Fig. 3 Standard deviation of COM acceleration before and after intervention by the balance improvement device.

でバランス評価を行った。重心フィードバック搭載型重心動揺計による効果は短時間で消失する可能性があるため、介入前のバランス評価は計測3回の最小値とし、介入後は1回の計測結果から判定する。

3.3 重心フィードバック搭載型重心動揺計の効果

バランス評価を適用したところ、重心フィードバック搭載型重心動揺計の介入によって、矢状面 COM 加速度の改善がみられた。図3に重心フィードバック搭載型重心動揺計の介入前後における COM 加速度に関するバランス評価の結果を示し、黒線が介入前、赤線が介入後である。被験者 A, H, I の3名は同機器適用後に COM 加速度の減少がみられ、機器の介入によってバランスが改善したと判断できる。しかし、COM 加速度が悪化した被験者も存在し、改善した被験者の理由もわからない課題が残された。

4. バランス改善要因の検討

COM 変位と COM 加速度の大きさによりバランスを評価してきたが、改善要因を明らかにするためにはより詳細な評価が必要である。より詳細な評価法として、COM 変位と COM 加速度の相関に注目した。すなわち、前に傾いたときの復元力と後ろに傾いたときの復元力が正確に発揮できているかを評価する。一方、COM 変位が小さい場合は復元力が正確に機能しないと考えられるため、図4に示すように COM 変位の標準偏差の1.2倍以上の場合の COM 変位と COM 加速度をプロットし、最小二乗法による一次関数近似と、近似直線からの標準偏差を求めた。この手法の狙いは、復元力 (COM 加速度) の評価を復元力の強さ (一次関数の勾配) とバランス制御の正確さ (一次関数からの標準偏差) に分割して評価することである。

図4にバランスが改善した被験者 A と改善しなかった被験者 B の結果を示す。いずれも介入前後における一次関数近似

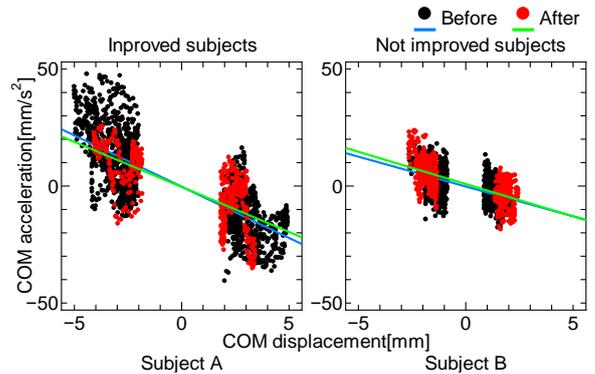


Fig. 4 Correlative evaluation between COM displacement and COM acceleration as an advanced balance evaluation method.

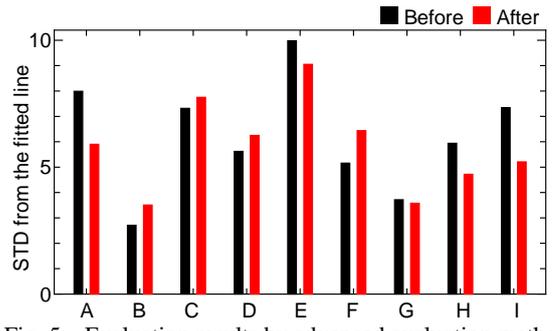


Fig. 5 Evaluation results by advanced evaluation method before and after intervention by the balance improvement device.

の勾配に変化はみられなかった。しかし、被験者 A は一次関数近似直線に対する COM 加速度の標準偏差に減少がみられた。図5に機器の介入前後におけるすべての被験者の一次関数近似直線からの COM 加速度の標準偏差を示す。この結果では、被験者 A, E, G, H, I は機器の介入によって近似直線に対する COM 加速度の標準偏差が減少し、正確な制御力が発揮できるようになったことがわかる。被験者 A, H, I は図3で改善した被験者と重複しており、機器の介入によって一部被験者の制御力の改善がなされている可能性が示唆された。

5. 結言

本研究では重心フィードバック搭載型重心動揺計による改善効果を、バランス評価法を用いて定量的に評価した。また、同機器介入によって COM 加速度の改善がみられた被験者が存在し、その改善要因について調査した。改善要因を詳細に評価するため、復元力の強さとバランスの正確性に分割して評価した。この評価により、機器の介入によって正確な制御力が発揮できるようになった被験者が存在することがわかった。

文献

- (1) 園部元康ほか, フォースプレート計測に基づく静止立位時の質量中心推定と立位バランス評価への応用, LIFE 2019 (2019).
- (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), 日本機械学会論文集 (2019)
- (3) 菅沼淳一, 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).