

バランス訓練における COP-COM 距離の 時系列推移の可視化による観察支援システムの開発

Development of an Observation Support System through Visualization of Time-Series Changes in COP-COM Distance during Balance Training

佐藤 侑樹 松田 浩一

Yuki Sato, Koichi Matsuda

岩手県立大学大学院

Graduate School of Iwate Prefectural University

Abstract: In this study, we developed a system to support physical therapists in observing patient movements during outpatient rehabilitation. The system focuses on balance training tasks involving reciprocal center-of-gravity shifts in multiple directions and visualizes the time-series transition of the distance between the Center of Pressure (COP) and the Center of Mass (COM). The system combines a COP-COM distance graph with a 3D skeletal representation, enabling therapists to better perceive and interpret the subject's condition. Through validation experiments simulating characteristics of right hemiplegia, as well as interviews with physical therapists, we confirmed that the system can visualize directional differences in center-of-gravity shifts that are difficult to capture through visual observation alone.

1. はじめに

通所リハビリテーションでは、バランス機能の維持や日常活動動作の改善を目的とした訓練が行われている。訓練時の説明は、理学療法士の観察による判断のもと、口頭により行われることが多い。そのため、利用者への効果の伝達が難しい場合がある。また、理学療法士の知識や経験の違いから、人により気づきの内容や質に違いが生じている。そこで、リハビリテーションの現場では、理学療法士の知識や経験を効果的に活かすため、客観的な情報の活用が推進されている。本研究では、バランス訓練を対象とし、経験的には知見としてあるものの、感覚的に捉えている重心移動の推移を可視化することによる効果的な観察支援を目指している。

大内ら[1]は、体幹の安定性の評価に関わる重心（足圧中心：Center of Pressure, 以下 COP）の移動に着目し、Nintendo バランス Wii ボード（以下、バランスボード）を用いて訓練中の重心移動をリアルタイムに可視化するバランス訓練システムを開発した。同システムでは、重心移動時の移動範囲と移動

速度を可視化する機能を有している。実験の結果、理学療法士だけでなく利用者自身も自身の状態を視覚的に把握することが可能となり、説明の説得性の向上やモチベーションへの寄与が見られ、訓練の効率化の一助となることが示された。

先行研究では、COP を姿勢制御の指標として用いているが、立位姿勢の制御は、身体重心（Center of Mass: 以下 COM）を支持基底面内に維持するために、COP を適切に移動させることで達成されると考えられている[2]。したがって、姿勢の安定性を評価するうえでは、COP 単独ではなく、COP と COM の相対的な位置関係にも重要な情報が含まれている。

筆者らは、バランスボードと Microsoft Azure Kinect DK（以下 Kinect）を用いて得た三次元骨格より COM 算出を行い、COP と COM の軌跡の概形を比較した[3]。バランス訓練システムにおける、様々なリハビリテーション利用者の特徴（右麻痺や円背など）を再現した被験者を対象とした実験により、軌跡に明確な違いが生じており、取得したデータの妥当性が確認された。

軌跡の概形は訓練全体の戦略を大まかに捉える上で有効である。一方で、より詳細な姿勢制御のメカ

リズムを観察するためには、動作中の変化に目を向ける必要がある。したがって、姿勢の安定性を観察するうえでは、軌跡の形状だけでなく、動作の進行に伴う COP と COM の相対的な位置関係に着目することは重要であるといえる。

Nishimura ら[4]は、高齢者の歩行開始動作を対象に COP と COM の協調性 (COP-COM 距離) を分析し、バランス能力が低い高齢者ほど前後方向の COP-COM 距離が有意に減少することを報告した。この結果は、姿勢の安定性を保つために代償的に協調性を低下させていることを示唆している。また、Sung ら[5]は、慢性腰痛患者における片脚立位時の COP と COM の動揺距離を分析し、腰痛患者では代償的なバランス制御のメカニズムとして、左右方向への COP-COM 距離が有意に増大することを示した。

これらの研究では、疾患の有無やバランス能力の違いが、特定の方向における COP と COM の距離の変化として反映されることを示している。しかし、先行研究の多くは片脚立位といった静的な姿勢や、歩行開始時などの単一方向への動作を対象としている。バランス訓練システムでは、前後左右斜め、と複数方向への重心移動を連続して行っている。そのため、特定の動作方向や集計値による指標ではなく、複数方向へ連続して動作する過程における COP-COM 距離の時系列推移を捉えることが重要である。

そこで本研究では、複数方向の重心移動の往復を行うバランス訓練を対象とし、COP と COM の距離の時系列推移を可視化するシステムの開発を行う。

2. 開発システム

2.1. 開発システム概要

図 1 に本システムの画面を示す。入力デバイスとして、3D で骨格抽出する Kinect と重心位置を出力するバランスボードを用いた。Kinect から取得した 3 次元の骨格座標データから COM を算出し、バランスボードから COP を取得する。システムはこれらの

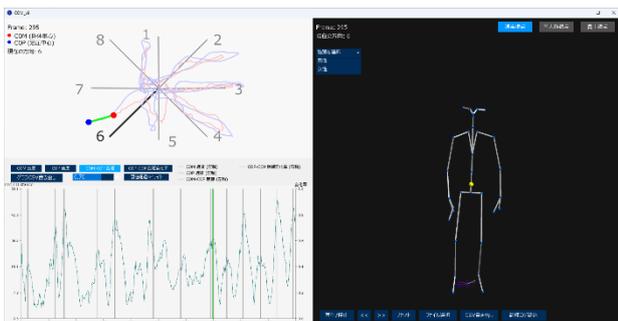


図 1. 提案システム

データを同期して読み込み、バランス訓練中の COP と COM の推移を可視化する。

システムのメイン画面は、(1) COP と COM の位置関係を平面上に示す「2D 重心軌跡」、(2) 距離等の時系列推移を示す「COP-COM 距離グラフ」、(3) 身体の動きを同期して表示する「3D 骨格」の 3 つのビューで構成される。

2.2. 2D 重心軌跡

取得した COP と COM の相対的な位置関係を直感的に把握するため、両者を同一の水平面上に統合して表示する (図 2)。骨格座標から質量比を用いて算出した 3D の COM 座標を水平面に投影し、バランスボードから得られた COP の座標と位置とスケールを合わせ「2D 重心軌跡」にプロットする。プロットされた最新の COP と COM の間には線を引き距離 (COP-COM 距離) の増減を分かりやすくしている。

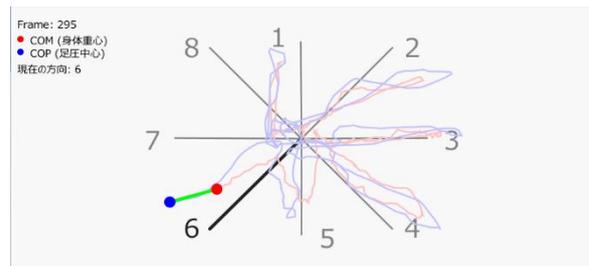


図 2. 軌跡表示

2.3. COP-COM 距離グラフ

平面上の COP-COM 距離を全フレーム算出し、時系列の折れ線グラフとして可視化する (図 3)。また、本グラフでは、COP-COM 距離の推移に加えて、COP-COM 距離の変化率と速度を重ねて表示することが可能である。また、COP-COM 距離が任意の閾値を超えた区間をグラフ上で自動的にハイライト表示する機能を有している。バランス訓練システムにおいて、COP-COM 距離が増大するタイミングは、その重心移動に対して大きな力が使われ、速い速度での重心移動が行われている瞬間であることが理学療法士とのヒアリングから分かっている。さらに、グラフ上に表示されるタイムバーを操作することで全体のフレームのシークが可能である。

2.4. 3D 骨格

Kinect から取得した関節座標データを用い、COP-

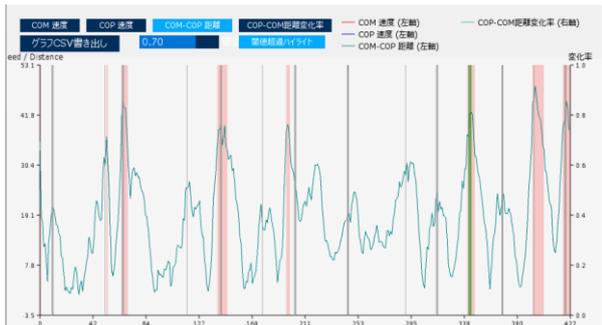


図 3. COP-COM 距離グラフ

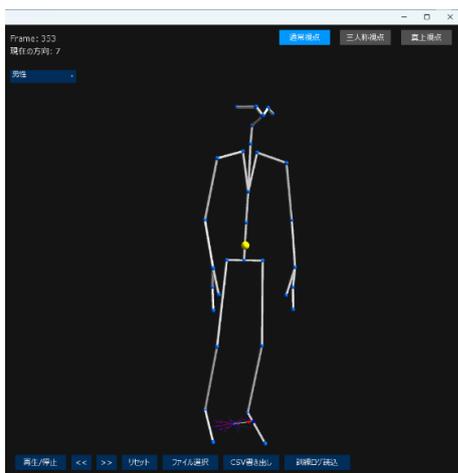


図 4. 3D 骨格表示

COM 距離グラフや 2D 軌跡のデータと同期した 3D 骨格モデルを表示する. COP-COM 距離グラフ上エリアのタイムバーや再生コントロールを操作することで, すべての表示エリアが連動し任意のタイミングにおける状態を確認することができる.

また, 3D 骨格エリアはマウス操作や視点切り替えボタン (正面, 第三者視点, 真上) により, 任意の角度から姿勢を観察することが可能である. これにより多角的な視点から詳細に利用者の姿勢を確認することができる.

3. システムの検証実験

3.1. データ取得環境

被験者 3 名 (理学療法士) に, 右麻痺の疾患を持つ利用者の特徴を模倣してもらい, バランス訓練システムによるデータ取得を行った. 動作計測のためのデバイスとして Kinect および, バランスボードを用いた. Kinect は被験者の正面約 2.3m, 床からの高さ約 0.5m の位置に設置し, 15fps で全身の骨格座標

を取得した. バランスボード (100Hz 程度) は被験者の足元に設置し, COP の軌跡データを取得した.

3.2. 右麻痺の姿勢特徴

図 5 に, 被験者 A が「右麻痺」の特徴を再現したときの姿勢を示す. 「右麻痺」の特徴を持つ利用者は, 麻痺をしていない側に体幹を傾け, その分腰を逆側につきだすことで, 姿勢制御を行う. バランス訓練時この姿勢を維持するため, 麻痺をしている右側へ重心移動をする時は, 主に腰の動きだけを用いて重心移動を行う.

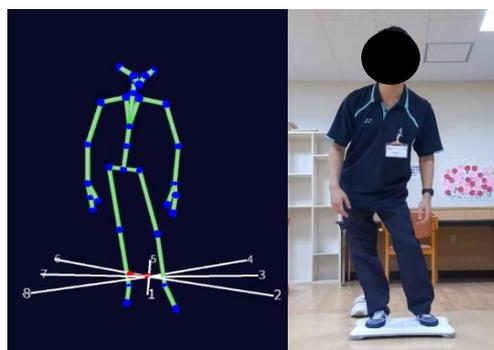


図 5. 右麻痺

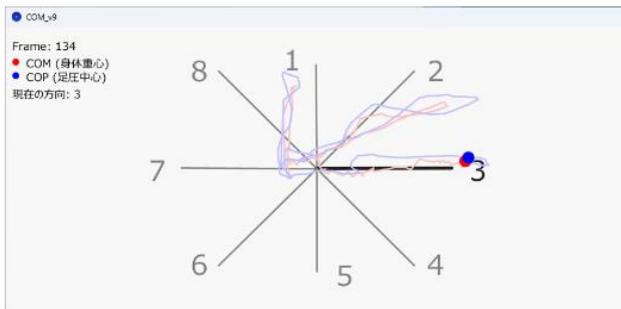
4. 結果

4.1. 2D 重心軌跡

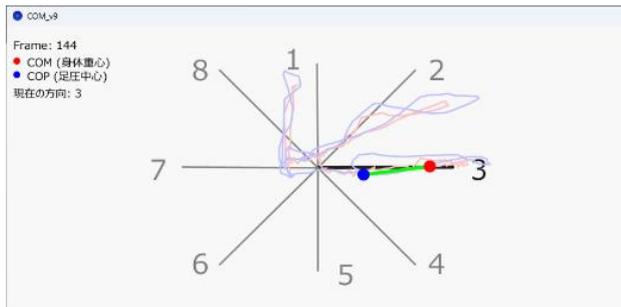
図 6 に, 被験者 A が右麻痺の特徴を模倣し, 右 (3 番) から原点へ重心移動をしたときの COP と COM の関係を示す. 図 6 より, 原点へ戻る際に COP が COM より動作方向に先行して動くことで COP-COM 距離が増大している様子が確認できる. これは, Winter ら[2]の目的位置となる原点を超えた COM の過剰な移動を COP の先行的な位置制御により制動している説明と一致する.

4.2. COP-COM 距離グラフ

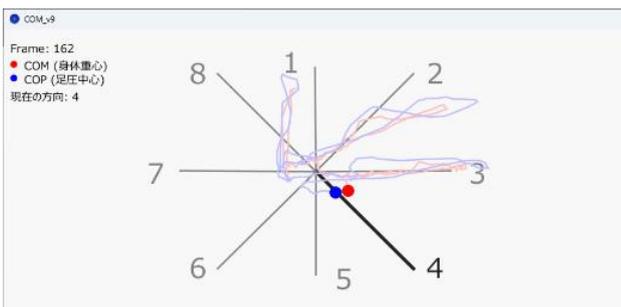
図 7 に, 図 6 の時刻に対応する COP-COM 距離グラフを示す. ここで, 縦の緑太線が現在時刻を表している. 図 7 より, 原点へ向かう重心移動において COP-COM 距離が増減している様子が確認できる. また, 閾値によるハイライト表示を使うことで, 容易に高い値を示す区間を確認できる.



(1) Frame 134



(2) Frame 144



(3) Frame 162

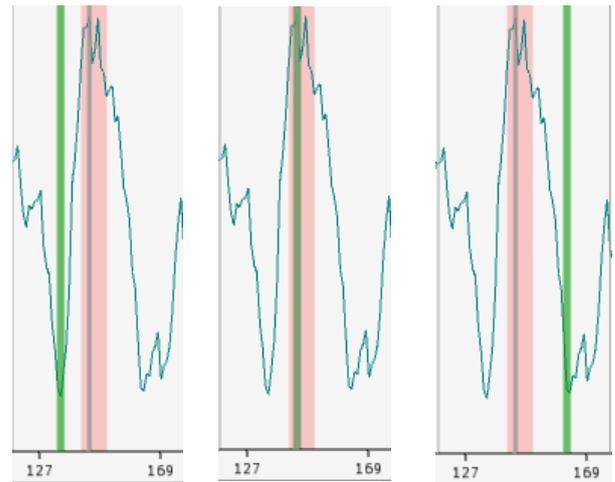
図 6. 右 (3 番) から原点へ戻る重心移動の軌跡

4.3. 3D 骨格

図 8 に、図 6 の時刻に対応する 3D 骨格を示す。図 6, 7 より、図 8(1)では、右方向 (3 番) において COP-COM 距離が少なく、安定した状態にあるが、右側に腰を突き出した姿勢となっていることが分かる。また、図 7(2), 図 7(3)のように推移する過程において、原点に戻ったときの直立した姿勢へ変化する様子が確認できる。これは、右麻痺の右側への重心移動の際の特徴である、臀部を動かすことによる重心移動の様子が表れている。

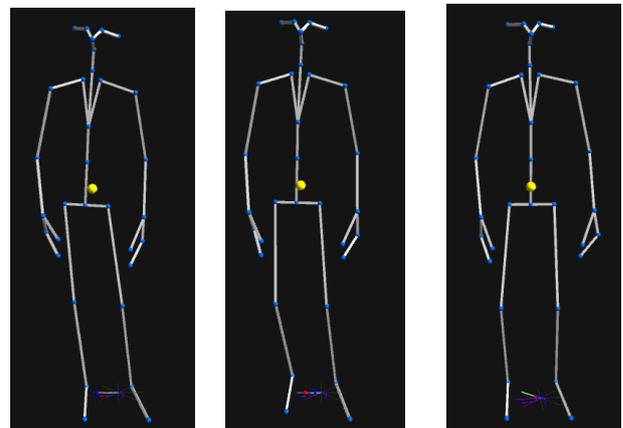
4.4. 考察

図 9 に、それぞれ右側方向 (麻痺側), 左側方向 (非麻痺側) へ重心移動を行った際の COP-COM 距離グラフとそのときの 3D 骨格の様子を示す。グラフ内



(1) Frame 134 (2) Frame 144 (3) Frame 162

図 7. 右 (3 番) から原点へ戻る重心移動のグラフ



(1) Frame 134 (2) Frame 144 (3) Frame 162

図 8. 右 (3 番) から原点へ戻る 3D 骨格

の青いプロットは中心から外側へ向かう「往路」のピークを、オレンジのプロットは外側から中心へ戻る「復路」のピークを示している。グラフを比較すると、移動する方向によって COP-COM 距離の増大するピークの振幅に明確な違いが確認された。この違いは、右麻痺の特徴的な姿勢に起因する左右の重心移動の仕方の違いによって生じたものだと考えられる。

体幹を傾斜させて重心移動をする左側方向は、上半身の質量を利用して重心を動かすことができるため、瞬間的に大きな推進力を生み出すことができ、原点から目標方向にいく往路のピーク値が、復路のピーク値より高くなったと考えられる。一方で、臀部を突き出すことで重心を移動する右側 (麻痺側) への動作では、瞬間的に大きな推進力を発揮するこ

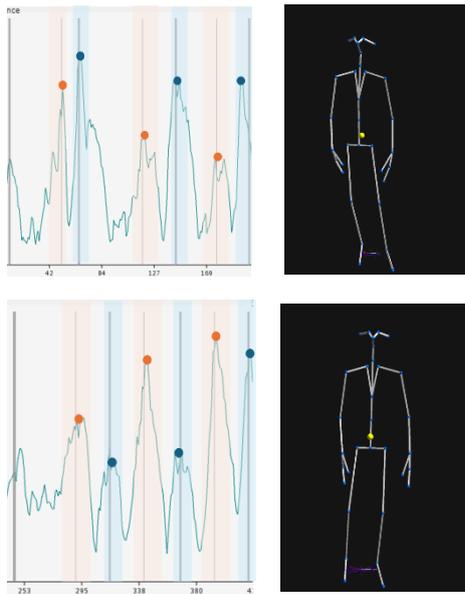


図 9. 可視化結果 右側移動（上） 左側移動（下）

とが困難であるため、往路における重心移動の勢いが制限され、結果として往路のピーク値が復路のピーク値を下回ったのではないかと考えられる。

4.5. 理学療法士へのヒアリング

実験で取得したデータを用いて、本システムの可視化結果を提示して、臨床現場における観察支援システムとしての有用性と課題についてヒアリングを実施した。

その結果、COP-COM 距離の推移を可視化することで、訓練を通して見るだけでは確認できていなかった各方向の往路と復路の重心移動の違いを可視化できているとのコメントを得た。

また、COP-COM 距離グラフの見かたについて話題となった。本稿では距離の大きさに着目していたが、速度なども良し悪しに影響するのではないかと、多様な見かたができる可能性がある。一方で、速ければ良いとも限らず、どのように解釈（良し悪しの判断）すべきかが今後の課題とされた。また、バランス訓練システムにおける姿勢制御は非常に微細な動きを伴うため、現在の 3D 骨格モデルによる表示では詳細な変化が想像しづらい場合があり、カメラ映像を併せた方がより観察しやすい可能性があるとのコメントが得られた。

5. おわりに

本研究では、通所リハビリテーションにおける理学療法士の動作観察および利用者への効果的な説明

を支援するため、複数方向の重心移動の往復を行うバランス訓練を対象とした「COP と COM の距離の時系列推移」を可視化するシステムを開発した。本システムでは、COP-COM 距離グラフと 3D 骨格表示を併用することにより、被験者の状態の気付きを支援することを目指した。

右麻痺の特徴を模倣した検証実験および理学療法士へのヒアリングの結果、視覚的に見るだけでは捉えきれなかった各方向への重心移動の違いを可視化できることが確認された。一方で、COP-COM 距離グラフの解釈について、極大値だけでなく、多様な情報を含んでいる可能性が話題となった。今後、データを積み重ね効果的な活用方法について議論する。

謝辞

研究を行うにあたり、盛岡医療生活協同組合川久保病院通所リハビリテーション理学療法士金子雅樹氏、佐々木拓哉氏、岩山翔太氏、竹田友紀氏には、研究における知見の提供、データ取得など、多くの協力をいただいたことに感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、JSPS 科研費 23K02688 の助成による。

参考文献

- [1] 大内 拓雄, 松田 浩一: 重心移動の可視化システムの開発と訓練への活用, 情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集, Vol. 2018, No. 1, pp. 465-466, (2018)
- [2] Winter D. A., Patla A. E., Prince F., Ishac M., and Giolo-Periczak K.: Stiffness Control of Balance in Quiet Standing, *J. Neurophysiol.*, Vol. 80, No. 3, pp. 1211-1221, (1998)
- [3] 佐藤 侑樹, 松田 浩一: バランス訓練時の COP と COM の概形比較による重心移動の分析法に関する一検討, 情報処理学会第 87 回全国大会講演論文集, Vol. 2025, No. 1, pp. 647-648, (2025)
- [4] Nishimura M., Kim H., Hasegawa T., and Uchiyama Y.: Center of Pressure-Center of Mass Coordination is involved in a Process of Acceleration Drive on Gait Initiation in Community Dwelling Elderly People: A Cross-Sectional Study, *International Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, Vol. 12, No. 5, pp. 1-6, (2024)
- [5] Paul S. Sung, Phyllis Rowland, and Dongchul Lee: Implications for fall efficacy strategies on center of pressure and center of gravity sway distances in adults with chronic low back pain, *European Spine Journal*, Vol. 33, No. 12, pp. 4581-4590, (2024)