Journal of Osaka Kawasaki
Rehabilitation University Vol.*15.2021*
pp.*9-14*

原　著

立位時の足圧中心に対し動揺方向を基準軸とする座標変換の提案

Coordinate Transformation Using the Direction of Sway Based on the Center of Foot Pressure When Standing as the Reference Axis

竹内直子 [1,2]　　綿森葉子 [2]　　久利彩子 [1]

[1] 大阪河﨑リハビリテーション大学：大阪府貝塚市水間 158 番地（〒 597-0104）
[2] 大阪府立大学　理学系研究科：大阪府堺市中区学園町 1 番 1 号（〒 599-8231）

Naoko Takeuchi[1,2] , Yoko Watamori[2] , Ayako Hisari[1]

[1] Osaka Kawasaki Rehabilitation University : 158 Mizuma, Kaizuka-city, Osaka 597-0104, Japan
[2] Osaka Prefecture University, Graduate School of Science : 1-1Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-city, Osaka 599-8231, Japan

要旨:【目的】COP の測定板で規定された座標から、被験者の動揺方向を基準軸とする座標に変換する手法を提案すること。【方法と結果】タンデム開脚立位から前方下肢での片脚立位をとらせ、COP を計測した。片脚立位開始直後の 1 秒間を解析区間とした。観測点間ごとに移動方向を算出し、30° ごとの方向に変換した。その最頻値となる方向を基準軸方向とし、その最大動揺幅を求めた。また、移動方向を 30° ごとのグループに分け、グループごとに観測点間移動距離の総和を求めた。総和が最大となった方向を基準軸方向とし、その最大動揺幅を求めた。頻度による基準軸も移動距離総和による基準軸も、どちらも試行ごとにその方向は異なっていた。【結語】人の COP において意味のある座標の回転を行うことが実現できた。測定板に足部を置く位置を規定することなく、動揺の程度を評価できることが示唆された。
キーワード：動揺方向、COP、座標変換、基準軸

ABSTRACT :[Purpose]This paper proposes a method to convert the coordinates specified for the center of foot pressure (COP) measurement plate to the coordinates for which the postural sway direction of a subject is the reference axis.[Method and Result] The COP was measured during the period from the tandem open-leg standing position to the one-leg standing position on the front limb. The analysis period was 1 s immediately after the one-leg standing position began. The reference axis direction was determined by two ways. The movement direction was calculated for each observation point and converted into the direction at every 30°. The direction that was the mode was set as the direction of the reference axis, and the maximum sway range was calculated. In addition, the movement direction was classified into groups of 30° each, and the total distance traveled between the observation points was calculated for each group. The direction for which the total distance was the maximum was set as the direction of the reference axis, and the maximum sway range was calculated. For each trial, the direction of the reference axis as determined based on the mode differed from that determined based on the total distance. [Conclusion]It was possible to rotate the coordinates meaningfully about the COP. It is suggested that the degree of sway can be assessed without specifying the position of the foot on the measuring plate.
Key words : Body sway direction; COP; Coordinate transformation; Reference axis

[1] 竹内直子　Naoko Takeuchi
E-mail : takeuchina@kawasakigakuen.ac.jp

受付日　2020 年 9 月 17 日　　受理日　2020 年 11 月 20 日
Receive Sep. 17, 2020. Accepted Nov. 20, 2020.

1．はじめに

立位安定性は足圧中心（COP：center of pressure）で評価されることが多い[1-3]。その評価項目には、軌跡長、面積、左右方向最大振幅、前後方向最大振幅などがある[4,5]。測定時の測定板での足部をおく位置の違いは、結果に影響を与える[6]。足部を接地する位置のばらつきは、解析後の結果のばらつきに影響することになる。そのため、測定板で規定された位置に足部を正確におくことが評価には必要である。足部のおき方に注意が常に必要になることは、対象者、検査者ともに、心理的・時間的・労力的に負担である。

そこで、足部をおく位置を規定することなく動揺の程度を評価できれば、COP の活用範囲が広がると考えた。それは、測定板で規定された座標を利用せずに、被検者自身の重心動揺を基準軸とする座標軸を利用するという方法である。

一般に、ある座標軸で得られたデータに対し座標軸を回転させることにより、互いの位置関係を維持したまま新たな値を得ることができる。この手法を用いて、人の COP に対して座標変換することは計算上可能である。しかし、回転による座標変換を COP に適用させる場合、回転の程度をいかに決定するかが問題となる。人の主観によることなく客観的に得られる値であり、その値が妥当であることが必要である。そこで、実際の COP データから、適切な回転角度を得る具体的な方法を提示し、意味のある座標変換を COP に対してもできることを示した。

本研究の目的は、COP の測定板で規定された座標から、被験者の動揺方向を基準軸とする座標に変換する手法を提案することである。

2．対象と方法

2.1　対象者

対象者は、日常生活が自立している歩行可能な女性 2 名（50 歳代）とした。対象者には、事前に本研究の目的、内容、参加の自由等を口頭にて説明し、研究参加の同意を書面で得た。本研究は、大阪河﨑リハビテーション大学研究倫理審査委員会の承認を得た（承認番号 OKRU30-A022）。

2.2　測定

測定には、重心動揺計 UM － BAR Ⅱ（ユニメック社）を用いた。サンプリング周波数は 100Hz とした。当該計測器から得られる時系列データは、荷重値および COP である。COP は、左右方向 COP（COPx）と前後方向 COP（COPy）から成る。

開始肢位は、非軸足下肢前、軸足下肢後ろのタンデム開脚立位（両足部内側縁の幅を身長× 0.05、後ろ足尖から前踵後面までの長さを身長× 0.05）で、後方足部に荷重、前方足部は接地程度とした。軸足はボールを蹴る足の反対の足と定義した。後ろ足角は規定しなかった。裸足で計測を行った。被験者の両手は腰部にあてさせた。視線は、前方 2 メートルで視線高さのマークを注視させた。検査者の合図で前方下肢での片脚立位をとらせた。この肢位を解析対象の肢位とした。片脚立位をおよそ 10 秒間保持させた。検査者は、測定終了操作後、被験者に検査終了の合図を伝えた。

測定回数は、対象者一人につき 10 回とした。

2.3　算出に用いたソフトウェア

すべての計算は、統計解析ソフトウェア R（The R Foundation for Statistical Computing, version 4.0.2）を用いた。

2.4　解析区間

解析区間は、片脚立位開始時点から 1 秒間とした。片脚立位開始時点は、被験者の体重と同じ値を荷重値が初めて示した時点 t_0 とした。すなわち、解析区間は t_0 から t_{100} である。

2.5　観測点間移動距離の算出

時点 t における観測点 p_t と 1 つ前の観測点 p_{t-1} との距離（観測点間移動距離）、つまり、p_{t-1} を始点とし p_t を終点としたベクトル $\overrightarrow{p_{t-1}p_t}$ の大きさ $|\overrightarrow{p_{t-1}p_t}|$ を、式 1 を用いて算出した。

$$|\overrightarrow{p_{t-1}p_t}|=\sqrt{(x_t-x_{t-1})^2+(y_t-y_{t-1})^2} \qquad \text{（式 1）}$$

$|\overrightarrow{p_{t-1}p_t}|$　：　観測点 p_t と 1 つ前の観測点 p_{t-1} との距離
p_t　：　時点 t における観測点
x_t　：　時点 t における左右方向 COP 座標（COPx）
y_t　：　時点 t における前後方向 COP 座標（COPy）

2.6　観測点間移動角度の算出

時点 t における観測点 p_t に対し、1 つ前の観測点 p_{t-1} からの移動偏角（観測点間移動角度：arg_t）を求めた。arg_t は、$\overrightarrow{p_{t-1}p_t}$ と、始線（計測器の X 軸の正の方向の半直線）とのなす角度である。arg_t は、複素数の偏角を利用した式 2 により算出した。ただし、arg_t は $-180° < arg_t \leqq 180°$ とした。

$$arg_t=\arg\{(x_t-x_{t-1})+(y_t-y_{t-1})\times i\} \quad (-180°<arg_t \leqq 180°) \qquad \text{（式 2）}$$

arg_t　：　ベクトル $\overrightarrow{p_{t-1}p_t}$ と始線（計測器の X 軸の正の方向の半直線）とのなす角度
p_t　：　時点 t における観測点
i　：　虚数単位

x_t　：時点 t における左右方向 COP 座標（COPx）
y_t　：時点 t における前後方向 COP 座標（COPy）

2.7　観測点間移動方向の決定

arg_t は連続的な値をとるため、このまま移動した方向として解析に用いるのは適さない。そこで、得られた arg_t の値は、360° を 12 分割し 30° ごとの移動方向 dir_t に変換した。図 1 に示す通り、$-15° \leqq arg_t < 15°$ のとき $dir_t=0°$ とし、左回りに 30°、60°…180°、右回りに－30°、－60°…－150° とした。特に、$-180° < arg_t < -165°$ または $165° \leqq arg_t \leqq 180°$ のとき $dir_t=180°$ である。

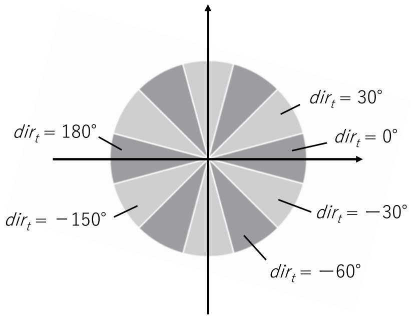

図 1　方向の分割方法

30° ずつ区切って 12 方向とした。$-15° \leqq arg_t < 15°$ のとき $dir_t=0°$ である。特に、$-180° < arg_t < -165°$ または $165° \leqq arg_t \leqq 180°$ のとき $dir_t=180°$ である。

2.8　解析除外データ

事前に計測器の精度実験を行い、COPx および COPy の移動距離の誤差は ± 0.3mm であることを確認した。このことを踏まえ、$|\overrightarrow{p_{t-1}p_t}|$ が 0.3mm 未満のデータは解析対象から除外した。

2.9　軸の決定

2.9.1　頻度による軸の決定

2.7 で得られた観測点間移動方向を用いて、その移動方向の度数を求めた。最頻値となった移動方向を、基準軸方向とした。図 2 に、移動方向の円ヒストグラムの代表例を示す。矢印が最頻値の方向を示し、破線が基準軸を示す。基準軸方向は－120° の方向となる。

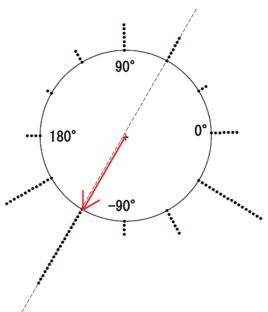

図 2　移動方向の円ヒストグラムの代表例

矢印は最頻値の方向を示し、破線が基準軸となる。この例では、基準軸方向は－120° の方向となる。

2.9.2　移動距離総和による軸の決定

2.6 で得られたベクトル $\overrightarrow{p_{t-1}p_t}$ を 2.7 で得られた観測点間移動方向ごとにグループ化し、グループ内の $|\overrightarrow{p_{t-1}p_t}|$ の総和を算出した。$|\overrightarrow{p_{t-1}p_t}|$ の総和が最大となった移動方向を、基準軸方向とした。図 3 に、移動方向ごとの移動距離総和のグラフの代表例を示す。図 3 は、図 2 と同一のデータに対する図であるが、基準軸方向は－30° の方向となる。

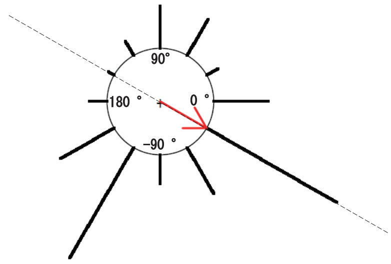

図 3　移動方向ごとの移動距離総和を示すグラフの代表例

矢印は移動距離総和が最大となる方向を示し、破線が基準軸となる。この例では、基準軸方向は－30° の方向となる。

2.9.3　決定した基準軸方向

決定した基準軸方向の結果を表 1 に示す。

表 1　基準軸方向

被験者 A

試行	頻度を元にした基準軸方向	移動距離総和を元にした基準軸方向
1	−60°	120°
2	30°	60°
3	−150°	−150°
4	−30°	−30°
5	−90°	−90°
6	60°	60°
7	180°	180°
8	−120°	−30°
9	30°	30°
10	120°	120°

被験者 B

試行	頻度を元にした基準軸方向	移動距離総和を元にした基準軸方向
1	120°	120°
2	−90°	150°
3	30°	90°
4	90°	−120°
5	−90°	−90°
6	−30°	−30°
7	90°	90°
8	90°	−60°
9	120°	120°
10	90°	90°

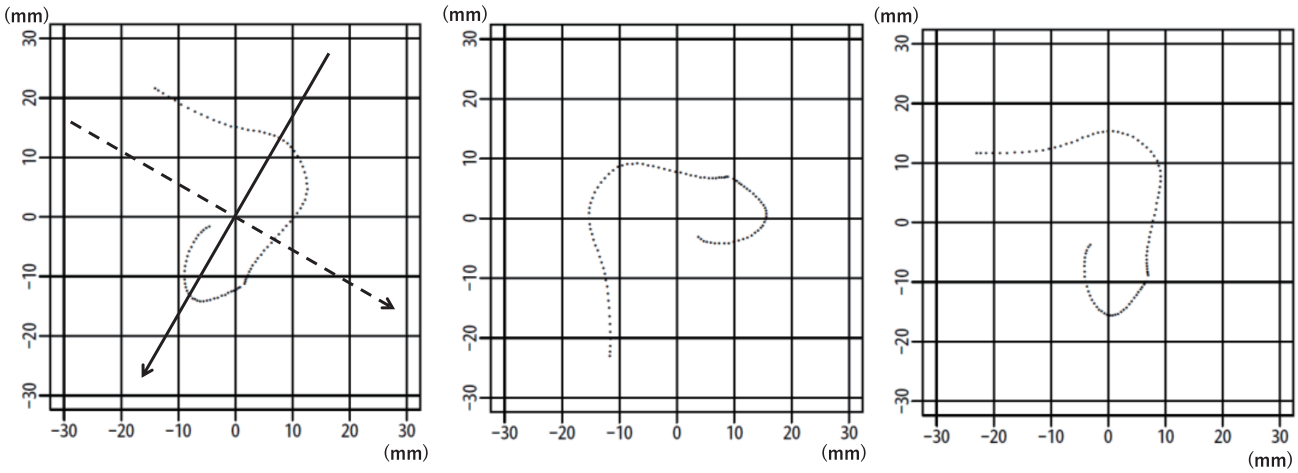

図 4 座標変換前および座標変換後の動揺図

左：座標変換前
中央：頻度を元にした基準軸による座標変換後
右：移動距離総和を元にした基準軸による座標変換後
実線矢印が、頻度を元にした基準軸方向。破線矢印が、移動距離総和を元にした基準軸方向。原点は、*COPx*、*COPy* の平均。

2.10　座標変換による新たな時系列データの取得

計測で得られた COP に対し、2.9.1 により得られた基準軸が X 軸となるように、回転座標変換行列を用いた式 3 による座標変換をおこなった。この座標変換後のデータにおける基準軸方向の時系列データ COPa を、新たに得た。同様に、計測で得られた COP に対し、2.9.2 により得られた基準軸が X 軸となるように、式 3 を用いて座標変換をおこなった。この座標変換後のデータにおける基準軸方向の時系列データ COPb を、新たに得た。

$$\begin{pmatrix} COPnew\_x\_t \\ COPnew\_y\_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} COPx\_t \\ COPy\_t \end{pmatrix} \quad \text{（式 3）}$$

θ　：　基準軸方向
COPx_t　：　変換前の時点 *t* における *COPx* の値
COPy_t　：　変換前の時点 *t* における *COPy* の値
COPnew_x_t　：　変換後の時点 *t* における基準軸での座標値
COPnew_y_t　：　変換後の時点 *t* における基準軸に直交する軸の座標値

2.11　座標変換後の動揺図の例

座標変換前および座標変換後の動揺図の代表例を図 4 に示す。これは、図 2、図 3 と同一のデータに対する動揺図である。

2.12　座標変換後の時系列データの例

座標変換前（COPx､COPy）および座標変換後（COPa、COPb）の時系列データの代表例を図 5 に示す。図 5 に示した COPa は図 4 中央の横軸方向、COPb は図 4 右の横軸方向の時系列グラフである。

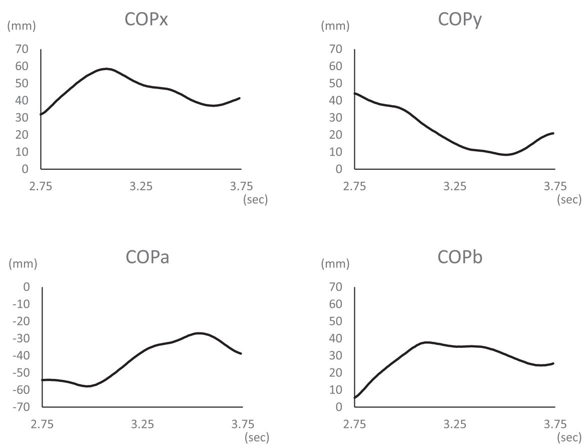

図 5　座標変換前後の時系列グラフの代表例

3．最大動揺幅への適用

時系列データ COPx、COPy、COPa、COPb のそれぞれにおいて、式 4 を用いて最大動揺幅を算出した。結果を表 2 に示す。

Dwide ＝ dmax － dmin　（式 4）

Dwide　：最大動揺幅
dmax　：当該データの最大値
dmin　：当該データの最小値

表 2　時系列データ COPx、COPy、COPa、COPb のそれぞれにおける最大動揺幅

被験者 A

試行	最大動揺幅(mm)			
	COPx	COPy	COPa	COPb
1	15.2	47.3	47.4	47.4
2	17.5	26.8	18.9	25.9
3	17.3	16.2	19.8	19.8
4	27.8	16.7	32.3	32.3
5	26.2	34.4	34.4	34.4
6	22.4	17.2	25.2	25.2
7	25.9	18.7	25.9	25.9
8	26.7	35.8	30.9	32.2
9	12.2	16.9	17.5	17.5
10	23.0	18.9	22.7	22.7

被験者 B

試行	最大動揺幅(mm)			
	COPx	COPy	COPa	COPb
1	15.3	26.4	29.0	29.0
2	8.3	12.1	12.1	11.3
3	20.4	27.3	24.9	27.3
4	12.1	16.0	16.0	16.8
5	11.5	24.0	24.0	24.0
6	13.1	10.3	14.6	14.6
7	16.7	22.6	22.6	22.6
8	11.9	10.7	10.7	13.3
9	10.1	24.4	26.0	26.0
10	9.0	30.3	30.3	30.3

COPx：測定で得られた左右方向の時系列データ
COPy：測定で得られた前後方向の時系列データ
COPa：観測点間の移動方向の頻度により基準軸を決定し座標変換した後の基準軸方向の時系列データ
COPb：観測点間の移動方向ごとの移動距離総和により基準軸を決定し座標変換した後の基準軸方向の時系列データ

4．考察

人が日常生活で行う立位移動動作には、立位姿勢のバランス能力が必要である。このバランス能力を定量評価する手段の一つに、COP を用いたバランス検査がある。本研究では、COP を用いた動揺の評価方法として、測定板で規定された座標軸を使うことなく、被験者の動揺の方向を基準軸とすることを提案した。評価は、身体の前後方向、左右方向を基準として行うため、測定板上で足部をおく場所を規定する必要がある。常に同じ位置に足をおくという動作は、対象者、検査者ともに、心理的・時間的･労力的に負担である。この負担を解消するために、測定板の座標とは無関係に足をおいても評価が可能となる手法として、最大動揺方向を基準にすることを考えた。本研究では、最大動揺方向を求めるために、観測点間での移動方向を用いた。測定板の座標軸に依存しない評価方法としては、COP の分布に対して主成分分析を行い信頼楕円を用いる方法がある[7-9]。筆者らが提案する手法は、観測点間での移動方向を用いて、逐次的な動きの情報も捉えることが可能である。

被験者の最大動揺方向を求める際に、方向を 30° ごとに 12 分割した。収集データから算出した観測点間の移動方向は連続的な値をとるため、最大動揺方向を決定することは困難となる。そこで、方向を 30° ごとに集約し、解析を実施することとした。

最大動揺方向を決定する方法として、頻度を元にした方法と､移動距離総和を元にした方法の２種類を提案した。頻度による方法では、動揺の大きさは方向決定に影響を与えない。一方、移動距離総和による方法では、他の動揺に対し非常に大きな動揺が１つある場合、その１つの大きな動揺に結果が引っ張られるという特徴がある。

これら２種類の方法は、研究目的によって選択されるべきと考える。動作直後を解析対象とするなど、大きな揺れの方向を捉えたい場合には移動距離総和による方法が適する。また、動揺が安定した区間では頻度による方法が適するであろう。

表１に示す通り、頻度による方法と移動距離総和による方法で得たそれぞれの基準軸方向は、どちらも試行ごとに異なる値をとっていた。本研究の計測肢位はタンデム立位から前方側部の片脚立位であったため、前後方向の揺れが多くなると予想したが、結果は様々な値をとった。つまり、揺れの方向は試行ごとに異なるため、身体のどの方向に揺れているのかという情報の重要性は低いと言える。

提案した手法により座標変換した後のデータにおいて最大動揺幅を算出した。軌跡長、面積、動揺幅といった代表的な評価指標のうち、座標の回転により値が変化する指標の一例として最大動揺幅を取り上げた。表２に、試行ごとの基準軸方向に対する最大動揺幅を示した。こ

れは、測定で得られたデータにおける左右方向と前後方向の最大動揺幅と、座標変換した後の基準軸方向の最大動揺幅である。本研究で提案した軸回転の手法により、COP を測定する測定板上で足部をおく場所を規定することなく動揺幅を得ることができた。

観測点間の移動方向の頻度により基準軸を決定する、または、観測点間の移動距離総和により基準軸を決定するという手続きを経ることによって、人の COP において意味のある座標変換を行うことが実現できた。

5．まとめ

COP の測定板で規定された座標から、被験者の動揺方向を基準軸とする座標に変換する手法を提案した。片脚立位開始直後の１秒間を解析した。観測点間ごとに移動方向を算出し、それぞれ 30° ごとの方向に変換した。これより基準軸方向を算出した。基準軸方向は２種類提案した。1 つは 30° ごとの方向に変換した値の最頻値となる方向を基準軸方向とするもの、もう１つは移動方向を 30° ごとのグループに分けグループの観測点間移動距離の総和が最大となった方向を基準軸方向とするものである。加えて、被験者の動揺方向による基準軸を用いて動揺の程度を示し、その適用例を提示した。人の COP において意味のある座標の回転を行うことが実現できた。測定板に足部を置く位置を規定することなく、動揺の程度を評価できることが示唆された。

利益相反

本研究において、開示すべき利益相反はない。

参考文献

1）藤原勝夫：姿勢制御の神経生理機構 . 杏林書院 , 東京 , pp.44-45, 2011.
2）奈良勲 , 内山靖：姿勢調節障害の理学療法 . 医歯薬出版株式会社 , 東京 , pp.185-191, 2014.
3）伊藤八次：重心動揺検査 . 臨床検査 , 56:637-643, 2012.
4）時田 喬：重心動揺検査 . アニマ株式会社 , 東京 , 2006.
5）内山靖 , 小林武 , 間瀬教史：計測法入門　測り方，測る意味 . 協同医書出版社 , 東京 , pp.145-156, 2008.
6）浅井正嗣：重心動揺検査の国際基準化とわが国の問題点と今後の動向 . Equilibrium Research, 75:135-141, 2016.
7）Oliveira LF, Simpson DM, Nadal J: Calculation of area of stabilometric signals using principal component analysis. Physiol Meas, 17:305–312, 1996.
8）deOliveira JM: Statokinesigram normalization method. Behavior Research Methods, 49:310-317, 2017.
9）Chiari L, Rocchi L, Cappello A: Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. Clinical Biomechanics, 17: 666–677, 2002.