

# 前方向の3軸速度・角速度の時系列情報だけを用いた歩行安定性余裕の推定

Estimation of margin of gait stability using interior time-series information only on triaxial and angular velocities of a single body segment

○学 Liu Ziqi (都立大) 学 黒田 知士 (都立大) 正 岡本 正吾 (都立大) 秋山 靖博 (信州大)

Ziqi LIU, Tomohito KURODA, Shogo OKAMOTO, Tokyo Metropolitan University

Yasuhiro AKIYAMA, Shinshu University

Gait stability indices play an important role in both clinical and commercial applications and are effective for estimating an individual's fall risk. In general, the computation of gait stability indices requires motion-capture systems to measure the positions and angles of multiple body segments. If the stability indices can be estimated from the time-series data of a single body segment, they can be easier to access. We used principal motion analysis to estimate the margin of stability, which is a popular gait stability index, based on the time-series of the angular velocities of the pelvis during walking. The linear combination of three principal motions could estimate the minimum margin of stability along the interior direction with a correlation coefficient of 0.93. The angular velocities of the pelvis can be used to estimate gait stability independently or in conjunction with other kinematic information.

**Key Words:** Gait Stability, Margin of Stability

## 1 緒言

歩行安定性指標は通常歩行時や歩行障害時の転倒リスクを推定するために使用される [1]. 本研究では、運動学的情報を用いて姿勢の安定性を評価する前方向の安定性余裕 (MoS) [2] に着目した。

前方向の MoS を計算するためには、人体の質量中心 (CoM) と両足の時系列位置、つまり少なくとも 3 点の計測が必要である。本研究では、モーションキャプチャシステムの代わりに 1 つの慣性観測ユニットを用いて取得される運動学的情報から前方向の MoS を推測することを目的としている。

Iwasaki ら [3] は、CoM の 3 軸並進速度の時系列情報を用いて内外側方向 MoS の最小値を推定した。内外側方向 MoS の観測値と推定値の相関係数は 0.68 であった。Iwasaki らは主動作分析 [4-6] を用いて内外側方向 MoS と CoM の速度の関連付けを行った。本研究では主動作分析および CoM に近い骨盤の角速度を用いて前方向の MoS の最小値を推定した。Iwasaki ら [3] は CoM の速度を用いて MoS 値を推定しているが、骨盤の角速度は慣性計測装置を用いて容易に測定することが可能である。したがって、実用化に向けて骨盤角速度が MoS 値推定へ有効であることを検討することが重要である。

## 2 前方向の転倒余裕 (MoS)

Fig. 1 に示すように、前方向の MoS は任意の瞬間における CoM の外挿位置 (XCoM) と支持基底面 (支持脚) の端点との矢状面における距離として定義され、前方向の転倒に対する余裕を示す。任意の瞬間を  $t$  とすると、CoM の外挿位置 ( $x_{com}(t)$ ) は近い将来における CoM の予測位置であり、以下のように定義

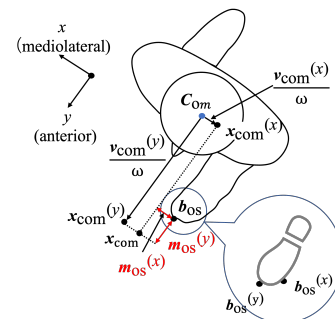


Fig.1 Interior margin of stability from the overhead view. Postural stability along the mediolateral direction during walking.

される。

$$x_{com}(t) = c_{om}(t) + \frac{v_{com}(t)}{\omega}, \quad (1)$$

ここで、 $c_{om}(t)$  と  $v_{com}(t)$  はそれぞれ CoM の前方向の位置と速度であり、 $\omega$  は次のように計算される。

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (2)$$

$g$  は重力加速度、 $l$  は直立姿勢での CoM の床からの高さである。前方向の MoS は次のように定義される。

$$m_{os} = b_{os} - x_{com} \quad (3)$$

MoS 値は前方向と内外側方向について計算することができる。本研究では、前方向 MoS のみを使用した。黒田ら [7] は前方向と内外側方向の MoS 間の関係について研究している。本研究では歩行周期中の前方向の MoS の最大値を使用した。これは、矢状面における質量中心の将来予測位置と支持基底面の端点との距離が、最も近くなるタイミングと一致し、最も前方向に不安定になるタイミングを意味する。通常の歩行では、前方向の MoS は負の値をとる。その最大値は歩行周期の約 0% と 50%、すなわち両脚立脚期の初期に現れる [2]。

### 3 方法

#### 3.1 歩行データベース

本研究では AIST 歩行データベース [8] のデータセットを使用した。その中で高齢者 60 名（健康な女性 30 名、男性 30 名、平均年齢  $67.6 \pm 3.4$ ）の歩行サンプルを使用した。参加者は 10m の直線上を各自の適当な速度で歩行した。光学式モーションキャプチャシステムを用い動作捕捉しており、連続する 2 歩中における体の各部位の三次元座標情報が公開されている。右足の接地からなる歩行を、1 人あたり 5 試行用いており、合計で 300 サンプルを研究に用いた。

#### 3.2 主動作分析

主動作分析 [3] は多変量時系列解析の一つで、冗長な多変量時系列データを解析する方法である。線形結合が多変量時系列サンプルを近似するように、主動作と呼ばれる基底関数は決定される。ある動作サンプルは、第一主動作、第二主動作、第  $n$  主動作と分解され、これらの主動作の線形和として表される。主動作は、MoS と主動作得点の相関が最大になるように決定する。正常な歩行運動は、2~3 個の時系列基底を用いて表現することができる [3, 9]。主動作のスコアは、サンプルがその主動作をどの程度含んでいるかを示す。各主動作についてスコアと目的値の分散が最大となるようにスコアを決定する。ある動作が複数の主動作に分かれている時、各主動作の重み付け係数（主動作スコア）をつける。

本研究では、連続した 2 歩からなる歩行サンプルにおける前方向の MoS の絶対値の最小値を目的値とした。多変量時系列サンプルは 3.4 で述べるように、骨盤の角速度と 3 軸の並進速度である。

#### 3.3 交差検証

研究に用いた 300 サンプルをランダムに 10 分割し、そのうちの 1 つをテストデータ、残りをトレーニングデータとし、主動作分析を行った。主動作分析を 10 回繰り返し、相関係数の平均値とその標準偏差を計算した。主動作は第五主動作までを計算した。用いる主動作によって相関係数の平均値と標準偏差に違いがあるかを確認した。第一主動作のみを使用した場合、第二主動作までを使用した場合、第三主動作までを使用した場合、第四主動作までを利用した場合、第五主動作までを使用した場合について比較を行った。

#### 3.4 骨盤のヨー、ロールとピッチ速度

MoS は CoM の並進運動に基づいて計算される。慣性計測ユニットを使用する場合、骨盤は骨の形状を容易に触知できるため、計測ユニットを取り付けるのに適した部位であると考えられる。また、骨盤付近は筋肉や脂肪組織が少ないため、計測ユニットを固定することができる。主動作分析に用いる時系列姿勢データとして、骨盤のヨー、ロールおよびピッチ速度を用いた。本研究では慣性計測ユニットを用いていない。代わりに、骨盤にある左右の前上腸骨棘 (ASIS) と仙骨 (Sacrum) の座標を使って、骨盤の角速度を計算した。左右の ASIS を結ぶベクトルからロールと

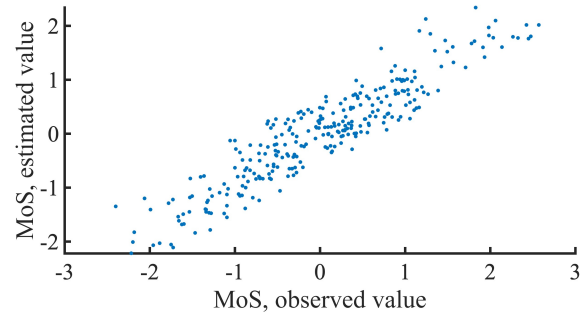


Fig.2 Estimation of the minimum anterior margin of stability and observed value of the minimum anterior margin of stability.

ヨー速度を計算し、左右の ASIS の中点と仙骨を結ぶベクトルからピッチ速度を計算した。

### 4 結果

3 軸の骨盤の角速度と 3 軸の CoM の並進速度を合わせて 6 軸で主動作分析を行った。3 つの主運動スコアを説明変数とし、回帰分析を用いて前方向の MoS 最小値を推定した。その結果は、前方向の MoS の最小値の観測値と推定値の相関係数が 0.93 であった。この相関は、3 軸 CoM の速度を用いて MoS の値を推定した。Iwasaki ら [3] は 0.68 であり、角速度と並進速度を組み合わせることで高精度な推定が可能になった。

今回の研究では、10 フォールドの交差検証を行い、前方向 MoS の観測値と推定値間の相関係数の平均値と標準偏差を計算した。データの分割はランダムに行っているため、毎回の結果は同じではないが、一回の結果を利用して平均と標準偏差の値を出した。トレーニングデータの平均値と標準偏差を計算すると、主動作が増えるにつれて平均値と標準偏差が徐々に大きくなり、第四主動作で最高値に達するという結果が得られた。第一主動作のみの時、MoS の観測値と推定値間の相関係数の平均は 0.84 だった。主動作が増えるにつれて平均値も増加し、第四主動作まで追加したときに最大値となった。第四主動作までをしようとしたときの値は 0.91 であった。標準偏差も平均値と同様に、主動作の数が増えるにつれて増加する。標準偏差が最も大きくなるのは、第四主動作までときで、結果は 0.02 であった。

### 5 結論

MoS は転倒リスクを示す歩行安定性指標としてよく知られている。本研究では、慣性計測ユニットによる人体運動データの記録を考慮し、骨盤の 3 軸角速度の時系列データを用いて前方向の MoS の最小値の推定は可能である。これまでに単一区間の角速度から MoS を推定する試みはなかった。主動作分析を行った結果、推定された前方向 MoS の最小値は観測値と 0.93 という強い相関を示した。また、3 方向の質量中心の並進速度と骨盤のロール、ヨーおよびピッチを組み合わせることで、2 種類の速度のどちらか一方よりも高精度な推定が可能となる。

本研究では、光学式モーションキャプチャで記録された運動データを用いて骨盤の運動を算出したが、慣性計測装置と光学式モーションキャプチャでは運動情報の質が異なる。今後は慣性計測装置を用いて本手法の検証を行う予定である。

### 参考文献

[1] S. M. Bruijn, O. G. Meijer, P.J. Beek, and J. H. van Dieen. Assessing the stability of human locomotion: a review of cur-

- rent measures. *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 10, No. 83, p. 20120999, 2013.
- [2] A. Hof, M. Gazendam, and W. Sinke. The condition for dynamic stability. *Journal of Biomechanics*, Vol. 38, No. 1, pp. 1–8, 2005.
- [3] T. Iwasaki, S. Okamoto, Y. Akiyama, and Y. Yamada. Gait stability index built by kinematic information consistent with the margin of stability along the mediolateral direction. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 52832–52839, 2022.
- [4] C. Qiu, S. Okamoto, Y. Akiyama, and Y. Yamada. Application of supervised principal motion analysis to evaluate subjectively easy sit-to-stand motion of healthy people. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 73251–73261, 2021.
- [5] T. Iwasaki, S. Okamoto, Y. Akiyama, T. Inagaki, and Y. Yamada. Walking motions with high margin-of-stability values. In *IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, pp. 224–228. IEEE, 2021.
- [6] T. Iwasaki, S. Okamoto, Y. Akiyama, T. Inagaki, and Y. Yamada. Kinematic gait stability index highly correlated with the margin of stability: Concept and interim report. In *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 347–350. IEEE, 2021.
- [7] T. Kuroda, S. Okamoto, and Y. Akiyama. Verifying the independence of anterior and mediolateral margin of gait stability indices. *IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics*, 2022.
- [8] Y. Kobayashi, N. Hida, K. Nakajima, M. Fujimoto, and M. Mochimaru. AIST gait database 2019. 2019.
- [9] H. Oshima, S. Aoi, T. Funato, N. Tsujiuchi, and K. Tsuchiya. Variant and invariant spatiotemporal structures in kinematic coordination to regulate speed during walking and running. *Frontiers in Computational Neuroscience*, Vol. 13, p. 63, 2019.