

300人の歩行データを用いた歩行安定性指標と歩行パラメータの関係

Relationship between gait stability indices and gait parameters comprising joint angles using walking data of 300 people

○学 稲垣 貴士 (名古屋大) 正 秋山 靖博 (名古屋大)
 正 岡本 正吾 (名古屋大) 真弓 卓也 (名古屋大)
 正 山田 陽滋 (名古屋大)

Takashi INAGAKI, Nagoya University, inagaki.takashi@i.mbox.nagoya-u.ac.jp
 Yasuhiro AKIYAMA, Nagoya University Shogo OKAMOTO, Nagoya University
 Takuya MAYUMI, Nagoya University Yoji YAMADA, Nagoya University

Stability while walking is essential as accidents may lead to severe injuries. In this study, we calculated the margin of stability (MoS) and maximum Lyapunov exponent (λ_s), the two prominent stability indices of walking, using a gait database of 300 people with 1.5 strides. Thus far, the relationship between these indices and other gait parameters including joint angles has not been investigated for such a large participant pool. Therefore, we determined the relationship between these stability indices and gait parameters by using multiple regression analysis. The results showed that the MoS was dominated by walking speed in the forward direction and associated with various joint angles in the lateral direction. Conversely, no relationship was identified between λ_s and gait parameters. Although the MoS and λ_s represent certain aspects of gait stability, they are either independent or associated with only a part of gait parameters. Thus, the feature of gait motion represented by λ_s does not rely directly on the gait parameters. λ_s is not expected to be easily improved by modifying a specific gait parameter.

Key Words: Local dynamic stability, Margin of stability, Gait analysis, Gait stability

1 Introduction

高齢者がますます増える現代社会において、歩行における転倒は大きなリスクになりうる。歩行の安定性は、転倒の危険性を評価するために重要である。これまで、歩行の安定性を評価する様々な指標が提案されている [1]。局所的な歩行の安定性を評価する指標に、最大リアプノフ指数 (λ) がある [2]。また、力学的な力の釣り合いから歩行の安定性を考慮する指標として、Margin of Stability (MoS) がある [3]。

これまで、歩行の安定性に影響を与えうるさまざまなファクターが調べられてきた [4, 5, 6]。一方で、歩行の安定性指標、すなわち MoS や λ_s と関節角度を含む基本的な歩行パラメータの歩行中における関係性を議論した研究は少ない。Hak et al. らにより前進方向の MoS は歩行速度と負の相関があること、横方向の MoS は歩行周波数と正の関係があると報告されている [7]。また、 λ_s と歩行の関係と報告されている。しかしながら、歩行の安定性指標と、歩行中の関節角度を含めたより包括的な歩行パラメータを比較した研究はなかった。また、 λ_s と MoS はどちらも歩行の安定性を測る指標として理解されているが、これら二つの関係性は明らかではない。

本研究では、 λ_s と MoS、および歩行パラメータとの関係を歩行データ (AIST Gait DATABASE2019) を用いて調べた。これまで詳細に調べられてこなかった、歩行中の全身のパラメータと歩行の安定性指標の関係性を探ることにより、歩行の安定性を構成する要因を明らかにする。

2 Methods

2.1 Dataset

歩行データには、AIST 歩行データベース 2019 を用いた [8]。このデータは、健康成人 300 人分の約 1.5 ストライド分の歩行が左右 10 試行含まれている。モーションキャプチャシステム (Vicon 社製 Vicon MX システム・Vicon Nexus) と床反力計 (AMTI 社製 BP400600-1000 及び BP400600-2000) を用いて計測した。サンプリング周波数は 200Hz、全身の主要な部位にマーカーをつけ、位置情報を取得した。本研究では、その中から不完全なストライドを含んでいた 12 人のデータを除いた 288 人の健康な老齢男女のデータ (20 歳から 78 歳の男 141 人、女 147 人) を取得し、解析に利用した。

両 ASIS マーカの中心と仙骨マーカの中心を重心として用いた。また、Heel および Toe マーカを、足の接地判定および base of support の算出に用いた。データの解析には MATLAB R2020b (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.) を利用した。

2.2 Gait Parameters

本研究では、[9] より算出した歩行パラメータを用いた。用いた歩行パラメータは、表 1 に示す。

2.3 Margin of Stability

MoS は歩行を逆倒立振子でモデル化し、その安定性を評価する [3], [10]。MoS は以下のように算出される。まず、重心 CoM の位置と速度 V_{CoM} とから XCoM を算出する

$$XCoM = CoM + \frac{V_{CoM}}{\sqrt{\frac{g}{l}}} \quad (1)$$

Table 1: 歩行パラメータの一覧 (HC: heel contact; TO: toe off-timing; MFC: minimum foot clearance)

Gait parameters		
1	Step length (m)	Distance between the heel markers of right and left legs in the forward direction at HC
2	Step width (m)	Lateral distance between the right and left heels at the HC
3	MFC	Distance from the floor to the sole when the foot becomes parallel to the ground during the swing phase
4	Thigh tilt (HC) (deg)	Angle between the thigh and horizontal axis in the sagittal plane
5	Thigh tilt (TO) (deg)	Thigh tilt at the TO
6	Knee angle (HC) (deg)	Angle between the thigh and the lower thigh at the HC
7	Knee angle (TO) (deg)	Knee angle at the TO
8	Lower thigh tilt (HC) (deg)	Angle between the lower thigh and the horizontal direction at the HC
9	Lower thigh tilt (TO) (deg)	Lower thigh tilt at the TO
10	Foot angle (deg)	Angle between the vector from the distal end to the proximal end in the horizontal direction
11	Tilt of upper body (deg)	Inclination of the line connecting the midpoint between C7 and the upper body margin of the sternum
12	Ratio of COG position (lateral)	Ratio of the center of gravity (COG) positions on the area of the base of support (BoS) in lateral direction at the HC
13	Ratio of COG position (forward)	Ratio of COG position in the forward direction at the HC
14	Walking speed (m/s)	Average of the velocity of the center of mass in the forward direction
15	Stride frequency (Hz)	Inverse of one stride time defined as walking speed / stride length

ここで l は重心の高さ, g は重力加速度である. 次に, BoS を TOE のマーカの位置座標として算出し, 以下の様に, BoS と XCoM の margin として定義する.

$$MoS = BoS - XCoM \quad (2)$$

MoS > 0 のとき, 力学的に安定しており, MoS = 0 で釣り合い, MoS < 0 で不安定となる.

前進方向の MoS については, leading foot の TOE のマーカを BoS として用い, MoS を TOE のマーカと XCoM の座標の差として算出した. 横方向の MoS の算出は, 1) 重心速度ベクトルの向き, 2) 接地している足 (両足・右足のみ・左足のみ), を考慮して, 符号に注意して算出した.

MoS をラムダや歩行パラメータと比較するには, 歩行中で得られた MoS の波形から, どこかの地点を代表値として選ぶ必要がある. 本研究では, 前進方向では, 足を切り替えた直後の, 歩行が一番安定となる地点. 横方向では, 速度ベクトル方向に足を接地した後の margin が最小となる地点を選んだ.

2.4 Maximum Lyapunov Exponent

λ_s は, 歩行のダイナミクスを Takens theorem [11] に基づいて復元し, 状態空間上で動力的な安定性を評価する. 微小な変動を捉えることで, 局所的な歩行の安定性を定量化する. λ_s は以下のようにして算出される [1, 2]. 一次元の歩行の重心速度 $v(t)$ から, 埋め込み次元 m , 時間遅れ τ を用いて m 次元の状態空間 S を以下のように構築する.

$$S = [v(t) \ v(t+\tau) \ v(t+2\tau) \ v(t+3\tau) \ v(t+4\tau)] \quad (3)$$

False Nearest Neighbours Algorithm を用いて, 埋め込み次元 m を前進方向 $m=3$, 横方向 $m=5$ と算出した. Average Mutual Information を用いて, 時間遅れ τ をそれぞれ前進方向で 13, 横方向 6 と算出した [12], [13]. 構築した状態空間の中で, Rosenstein らのアルゴリズムを用いて divergence を算出した [14]. 得られた divergence curve の傾きが最大リアプノフ指数である. 本研究では, 0.5-1.0 歩のストライドを short-term の最大リアプノフ指数 λ_s として利用した.

2.5 Statistical Design

288 人の被験者の 10 試行の歩行データを用いて, λ_s , MoS それぞれについて, 表 1 に示した歩行パラメータで重回帰分析を行った. 多重共線性を排除するために, あらかじめ歩行パラメータの中で相関を計算し, 相関の高かったパラメータ ($r > 0.8$) を選択して削除した. thigh angle と hip angle の相関が高かったため, hip angle のみを用いた.

3 Results

歩行パラメータと二つの安定性指標で重回帰分析を行い, 得られた係数値とその 95% 信頼区間を図 1 に示す, MoS は, 横方向, 前進方向共に歩行速度の負の影響が大きい. 横方向に関しては, 種々の関節角度も負の影響を及ぼしていることがわかった. 決定係数は大きく (前進方向 $R^2 = 0.549$, 横方向 $R^2 = 0.226$), これら歩行パラメータによって MoS をある程度予測できていることが分かる.

一方, λ_s は決定係数がとても小さく, これらの歩行パラメータでは λ_s の値を説明できていない. 傾向として, 歩行速度が他のパラメータに比べて大きな影響を及ぼしてい

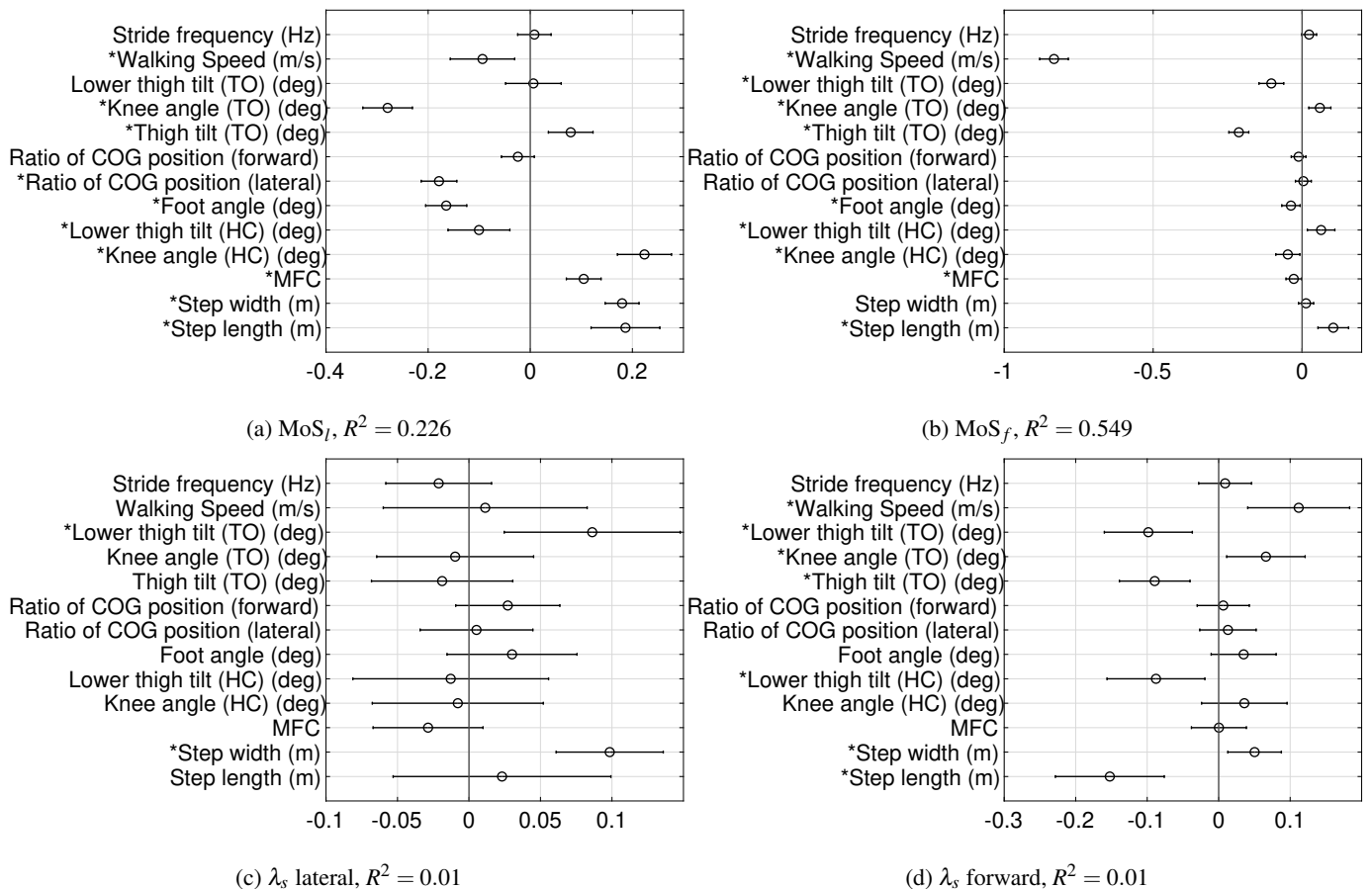


Fig.1: 歩行パラメータと安定性指標 (MoS, λ_s) の重回帰分析の係数値. MoS_f は前進方向, MoS_l は横方法を表す. エラーバーは 95%信頼区間を示す. (* 統計的に有意な係数)

ることは観察できるものの, 信頼区間の幅も広く, 個人差, 試行ごとの差が大きいことがわかる.

4 Discussion

4.1 Effect of Gait Parameters on MoS

4.1.1 Forward direction

重回帰分析の結果から, 歩行速度の影響が支配的であり, 安定性と歩行速度は負の関係があることが観察された. 歩行速度に比べると, 他のパラメータはほとんどが MoS の値に影響をしていないことがわかる. 歩行速度と前進方向の MoS の関係については, Hak らの結果において, 我々の結果と反対の歩行速度と MoS の正の関係が報告されている [7]. しかし, MoS の定義を考えると, 歩行速度と MoS に負の関係がみられる方が自然であると思われる. 歩行速度が大きくなると, XCoM が大きくなるため, BoS と XCoM のマージンは小さくなる. これは, 歩行速度が大きくなると MoS が小さくなることを意味している. また, 歩幅歩行パラメータ全体の中での寄与は大きくない.

4.1.2 Lateral direction

重回帰分析の結果から, 歩行速度, 歩行周波数を大きくすると, MoS が小さくなる, すなわち安定性が悪くなり, 歩幅を大きくすると安定性が向上することがわかった. 今回のこの結果は, [7] の結果と異なる. 彼らは, 歩行速度と歩幅は横方向の安定性には関係がなく, 歩行周波数だけ

正の関係があると報告している. MoS が小さくなるということは, 横方向に転倒しやすくなるということを表している. 直感的に考えると, 歩行速度が早くなると横に転倒しづらくなると考えられるが, 反対の結果が得られたのは興味深い. ただし, 信頼区間の幅が大きく, 個人差・試行差が大きいということに注意が必要である. 他に, Knee, Thigh angle も有意に負の関係が見られる. これらの角度は, MoS と何らかの関わりを持っていることが推察されるが, そのメカニズムを考察するのは難しいだろう. MoS が歩行を特徴付ける種々の角度と確かな関係を持つことが確かめられた. また, 影響は大きくないものの歩幅と正の関係が見られており, これは力学的にも正しい. すなわち歩幅を大きくすると歩行が安定する.

4.2 Effect of Gait Parameters on λ_s

λ_s と歩行速度の関係は, 使用するデータの形式の違いに影響を受けることが報告されており [15], 直接的に過去の事例と比較することが難しい. Hak らは λ_s の計算に 3 次元の歩行速度を組み合わせたものを用いており [7], λ_s と歩行速度の間に負の関係が見られたという報告をしている. Dingwell らは歩行速度と quadratic positive な関係が見られたと報告としており [16], England らは, 関節角度を用いて算出した λ_s が歩行と正の関係が見られたと報告してい

る [17]. Brujin らは, λ_s と前進方向の歩行速度の間に負の関係が見られたとしている [18].

今回の我々の結果は, 歩行速度と λ_s の間に何らかの傾向は見られているものの, 信頼区間が大きく, 個人差・試行差によるばらつきが大きい. また, 決定係数の値が非常に低いため, これらのパラメータでは λ_s の値を十分に説明できないことが示唆される. すなわち, 今回の結果は λ_s は歩行のパラメータと直接的に関係はしていないと解釈できるのではないか. 一方で, λ_s は, 若者と高齢者の歩行の区別 [19] ができ, fall history と関連がある [20] ことが報告されている. これらの結果と本研究から, λ_s は歩行のパラメータと直接関係していないような歩行の性質を見ているのだろうと考えられる. これは, λ_s の定義からもそう解釈できる. このことが, 過去の研究の結果が一貫していないことを説明できるかもしれない.

ただし, 今回の研究で用いた歩行データの長さは短く, [21] で説明されているように, 十分な長さのストライドがないと λ_s が一定の値に収束しないと考えられるため, 結果の解釈に注意が必要である. 一方で, [22] らによれば, λ_s が7ストライドのデータでバランスを崩した歩行を検出できたという報告もあるため, 短い歩行でも何らかの特性を掴むことはできるだろうと考えられる.

4.3 Relationship between λ and MoS

前進方向, 横方向共に得られた相関係数はとても小さく, MoS, λ_s の二つの指標間に関係性は見られなかった. やはり, MoS と λ_s は歩行の違う側面を見ており, 二つの指標には直接的な関係はないと結論づけられそうである. また, MoS と λ_s の歩行パラメータへの反応も明確に異なる.

5 Conclusions

288 人の 10 試行の歩行データを用いて, 有名な歩行安定性指標である MoS, λ_s , 各種歩行パラメータを算出した. 重回帰分析を行うことで, 個別のパラメータが他のパラメータに比べて相対的に MoS, λ_s の値にどれくらい寄与するかを調べた. MoS は速度の負の影響が支配的であったが, 種々の関節角度とも密接な関係を持つことが分かった. 一方で λ_s はほとんど歩行パラメータと関係をもたないことがわかった. この2つは歩行の安定性の指標としてそれぞれ用いられているが, この結果から, これら二つの指標は歩行の全く異なる側面を見ていると言えるかもしれない.

6 Acknowledgement

This study was supported by Japan Agency for Medical Research and Development (AMED) (hJP16he1202004i).

参考文献

[1] SM Brujin, OG Meijer, PJ Beek, and JH van Dieën. Assessing the stability of human locomotion: a review of current measures. *Journal of the Royal Society Interface*, 10(83):20120999, 2013.

[2] Jonathan B. Dingwell and Joseph P. Cusumano. Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 10(4):848, 2000.

[3] AL Hof, MGJ Gazendam, and WE Sinke. The condition for dynamic stability. *Journal of Biomechanics*, 38(1):1–8, 2005.

[4] Einat Kodesh, Michal Kafri, Gali Dar, and Ruth Dickstein. Walking speed, unilateral leg loading, and step symmetry in young adults. *Gait & Posture*, 35(1):66–69, January 2012.

[5] Kimberlee Jordan, John H. Challis, and Karl M. Newell. Walking speed influences on gait cycle variability. *Gait & Posture*, 26(1):128–134, June 2007.

[6] D.D. Espy, F. Yang, T. Bhatt, and Y.-C. Pai. Independent influence of gait speed and step length on stability and fall risk. *Gait & Posture*, 32(3):378–382, July 2010.

[7] Laura Hak, Han Houdijk, Peter J Beek, and Jaap H van Dieën. Steps to take to enhance gait stability: the effect of stride frequency, stride length, and walking speed on local dynamic stability and margins of stability. *PLoS One*, 8(12):e82842, 2013.

[8] Yoshiyuki Kobayashi, Naoto Hida, Kanako Nakajima, Masahiro Fujimoto, and Masaaki Mochimaru. 2019: *AIST Gait Database 2019*. <https://unit.aist.go.jp/harc/ExPART/GDB2019.html>, 2019.

[9] Takuya Mayumi Yasuhiro Akiyama, Shogo Okamoto and Yoji Yamada. Identification of healthy elderly's gait characteristics by analyzing gait parameters. *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR'21)*, pages xx–xx, March 2021.

[10] At L. Hof. The 'extrapolated center of mass' concept suggests a simple control of balance in walking. *Human Movement Science*, 27(1):112–125, February 2008.

[11] Floris Takens. Detecting strange attractors in turbulence. In David Rand and Lai-Sang Young, editors, *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*, Lecture Notes in Mathematics, pages 366–381, Berlin, Heidelberg, 1981. Springer.

[12] Matthew B. Kennel, Reggie Brown, and Henry D. I. Abarbanel. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Physical Review A*, 45(6):3403–3411, March 1992.

[13] A. M. Fraser. Using mutual information to estimate metric entropy. In *Dimensions and entropies in chaotic systems*, pages 82–91. Springer, 1986.

[14] Michael T Rosenstein, James J Collins, and Carlo J De Luca. A practical method for calculating largest lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 65(1-2):117–134, 1993.

[15] Sina Mehdizadeh. The largest lyapunov exponent of gait in young and elderly individuals: A systematic review. *Gait & posture*, 60:241–250, 2018.

[16] Jonathan B. Dingwell and Laura C. Marin. Kinematic variability and local dynamic stability of upper body motions when walking at different speeds. *Journal of Biomechanics*, 39(3):444–452, January 2006.

[17] Scott A England and Kevin P Granata. The influence of gait speed on local dynamic stability of walking. *Gait & posture*, 25(2):172–178, 2007.

[18] Sjoerd M. Bruijn, Jaap H. van Dieën, Onno G. Meijer, and Peter J. Beek. Is slow walking more stable? *Journal of Biomechanics*, 42(10):1506–1512, July 2009.

[19] Thurmon E. Lockhart and Jian Liu. Differentiating fall-prone and healthy adults using local dynamic stability. *Ergonomics*, 51(12):1860–1872, December 2008. Publisher: Taylor & Francis .eprint: <https://doi.org/10.1080/00140130802567079>.

[20] Marcel J. P. Toebes, Marco J. M. Hoozemans, Regula Furrer, Joost Dekker, and Jaap H. van Dieën. Local dynamic stability and variability of gait are associated with fall history in elderly subjects. *Gait & Posture*, 36(3):527–531, July 2012.

[21] Sjoerd M. Bruijn, Jaap H. van Dieën, Onno G. Meijer, and Peter J. Beek. Statistical precision and sensitivity of measures of dynamic gait stability. *Journal of Neuroscience Methods*, 178(2):327–333, April 2009.

[22] Lizeth H. Sloot, Kimberley S. van Schooten, Sjoerd M. Bruijn, Herman Kingma, Mirjam Pijnappels, and Jaap H. van Dieën. Sensitivity of Local Dynamic Stability of Over-Ground Walking to Balance Impairment Due to Galvanic Vestibular Stimulation. *Annals of Biomedical Engineering*, 39(5):1563–1569, May 2011.