

慣性計測ユニットを用いた歩行安定性評価指標の検討

Examination of walking stability evaluation index using Inertial Measurement Unit

学 ○長根尾 太朗 (名古屋大) 正 秋山 靖博 (名古屋大)
正 岡本 正吾 (名古屋大) 正 山田 陽滋 (名古屋大)

Taro NAGANEO, Yasuhiro AKIYAMA, Shogo OKAMOTO and Yoji YAMADA, Nagoya University

Japan faces a super-aging society. In order to support stable walking of elderly people with walking dysfunction, wearable walking support devices have been developed. However, no index for evaluating the effect has been shown. The purpose of this study is to construct an index to evaluate the walking stability with a wearable walking device. And, this new index aims to reflect the margin of stability based on Lyapunov exponent. In addition, using small and light Inertial Measurement Unit (IMU) acceleration data, it is expected that it will be possible to measure the effects of ancillary equipment anytime, anywhere. By clarifying the effect using this index, it is expected that the promotion of the spread of walking assist devices will be supported.

Key Words: Gait stability, Wearable gait support device, Inertial measurement unit

1 緒言

現在の日本は超高齢社会となっており、現在、総人口に占める65歳以上人口の割合は28.1% [1] であり、今後も高齢者の割合は増加する。こうした現状の中、歩行機能が低下した高齢者の安定した歩行を支援する歩行支援デバイスの開発が進められている。しかし、これら歩行支援機器による効果を表す指標は存在しない。本研究では歩行安定性に着目し、評価指標の開発を目指す。歩行安定性評価指標の開発によって、機器開発メーカーによるデバイスの性能評価やユーザーによる効果の「見える化」への応用が期待される。

これまで行われてきた歩行安定性評価の指標には、リアプノフ指数のような周期性のばらつきを表す指標と転倒までの余裕を表す安定性余裕があり、これら2つの指標は歩行動作の異なる側面を反映したものである。本研究の目的は、取得が容易なリアプノフ指数を基にした力学的な安定性余裕と相関のある安定性評価指標を開発することである。本研究では、歩行周期性と安定性余裕は人間の動作として関連付け可能であるという仮説を立て、指標開発を行った。

2 リアプノフ指数と安定性余裕

安定性評価指標には、リアプノフ指数のような周期性を表す指標と転倒までの余裕を表す安定性余裕が用いられる。リアプノフ指数は周期性のばらつきを表す指標である [2]。入力された時系列データから時間遅れを計算し、それらの点を状態空間上にプロットする。状態空間内の隣接軌跡間の距離を求め平均をとる。図1に示すように、0-0.5 ストライドにおける傾きの値が短期のリアプノフ指数（最大リアプノフ指数）(λ_S)、4-10 ストライドにおける傾きの値が長期のリアプノフ指数 (λ_L) である。この傾きの値が大きいほど動作のばらつきが大きいことを表す。

安定性余裕 (MoS: Margin of Stability) [4] は人間が前方に倒れるまでの余裕を表す。まず式1より XCoM を計算する。XCoM は重心の最大移動範囲となるパラメータである。このパラメータを支持基底面の端部の座標から引くことで計算される。

$$XCoM = CoM + \frac{V_{CoM}}{\omega_0} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (2)$$

$$MoS = BoS - XCoM \quad (3)$$

XCoM: 重心の最大移動範囲 CoM: 重心位置ベクトル
VCoM: 速度ベクトル ω_0 : 倒立振り子モデルの固有角振動数
g: 重力加速度 L: 重心から床面までの距離
MoS: 安定性余裕ベクトル BoS: 支持多角形

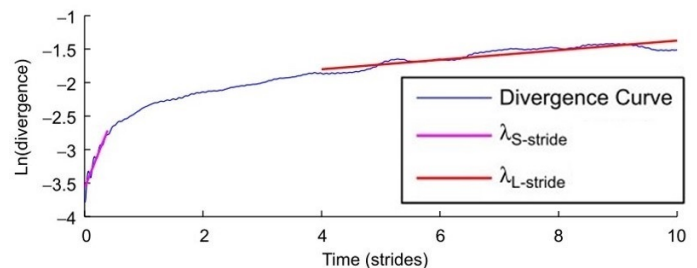


Fig.1 Lambda calculation[3]

これら2つの異なる要素の関係性を Hak[5] らが調べた。彼らの実験では歩幅、ケイデンス (歩調)、歩行速度をそれぞれ変化させた場合に MoS と最大リアプノフ指数の変化を調べた。ケイデンスの増加によって横方向の安定性が増加し、歩幅の減少および歩行速度の増加によって後方の MoS が増加した。一方で、いずれの歩行パラメータを変化させた場合にも最大リアプノフ指数には影響はなかった。すなわち、両指標に相関はなく、歩行動作の異なる側面を表す指標であると結論付けた。

しかし、これら2つの要素は人間の動きとして関係性があるのではないかと考える。本研究においては、歩行周期性と安定性余裕は人間の動作として関連付け可能であるという仮説を立て、リアプノフ指数のような歩行周期性を基本としつつ、力学的なパラメータも表現し、両者を関連付けるような指標を構築することを目指し、安定性評価指標の開発を行った。

3 安定性評価指標開発

本研究の目的はリアプノフ指数を基にした安定性余裕と相関のある安定性評価指標を開発することである。リアプノフ指数は計算容易な指標であるが、統計的なばらつきを表すものであり、安定性余裕のような力学的な指標とは異なる。本研究では、前述の仮説を基に2つの異なる要素を歩行動作として関連付け、リアプノフ指数を基本とした1つの指標として表現することを目指す。また、リアプノフ指数を計算する際の計測装置については慣性計測ユニット (IMU: Inertial measurement unit) を利用する。これは IMU が小型、軽量で、被験者の着衣等に容易に取り付け可能であることから、計測場所の制限を受けず、リアルタイムでの安定性解析が可能にすることを意図している。本研究では、リアプノフ指数に力学的な性質を反映させるために、状態空間を構築する変量を、身体各部の運動を代表する値から構成した。従来のリアプノフ指数の計算においては、1つの部位 (主に胸部および腰部) における時系列データにおいて時間遅れおよび埋め込み次元を決定することにより状態空間を構築していた。本研究では、各センサからの



● : IMU sensor

Fig.2 Sensor arrangement

Table 1 Sensor pattern

	Sensor pattern						
	A	B	C	D	E	F	G
back		○	○			○	○
sacrum	○		○	○	○		○
thigh.R	○		○		○	○	○
thigh.L	○				○	○	○
foot.R	○	○	○	○		○	○
foot.L	○	○		○		○	○

○ : State space configuration data

加速度データを状態変数として状態空間を構築した。入力データは背中、腰、両大腿部、両足背の6か所の前進方向または横方向の同一方向の加速度である。これは、下半身の各部位からのデータの位相差を反映させることにより、安定性余裕における倒立振子のようなモデルに近付けることを意図としている。センサの設置箇所は図2に示す。また、状態空間を構成する入力データの組み合わせを表1に示す。

4 実験および解析方法

提案した評価指標の有用性を確認するために、被験者3名に対して歩行実験を行った。被験者は、トレッドミル上で120秒間の定常歩行を行った。トレッドミルの設定速度を変化させて、計測を行った。本実験における歩行速度は、一般的な通常歩行速度である4.0 km/hの前後の3.0, 3.5, 4.0, 4.5 km/hの4通りの速度で行った。また、歩行安定性評価指標の計算に用いる3軸加速度データは、背中、腰、両大腿部、両足背の計6か所に取り付けたIMUセンサ(ATR-Promotions社製 TSND151)を用いて計測した。使用したIMUセンサは図3に示す。加えて、安定性余裕の計測のための動作解析をモーションキャプチャシステムによって行った。

次に解析する指標の算出方法について述べる。安定性余裕は最安定点であるかかと接地直後と最不安定点であるかかと接地直前の値を用いた。また、IMUから得た時系列データは100 Hzでリサンプリングし、設計したリアブノフ指数は20ストライド分のサンプル点から10Hzで連続的に計算した。

なお、指標間の相関を求める際は、MoSの最安定点、最不安定点に対応する時点におけるリアブノフ指数を用いた。



Fig.3 IMU sensor

5 実験結果

本実験で得られた結果を示す。表2は前進方向のMoSと各リアブノフ指数との被験者全体での相関係数を表し、表3は横方向のMoSと各リアブノフ指数との相関係数を表す。MoS_{max}, MoS_{min}はそれぞれMoSの最安定点および最不安定点を表す。λ_S, λ_Lはそれぞれ短期と長期のリアブノフ指数を表し、添え字は表1のパターンを表す。

前進方向についてはλ_Sにおいて最安定点および最不安定点のMoSとの相関は被験者全体では相関がみられなかった。パターンAおよびGのλ_Sと最不安定点のMoSにおいて、それぞれ相関係数が0.28, 0.26の弱い正の相関があった。なお、一部被験者では最不安定点のMoSとリアブノフ指数とで0.6程度の相関がみられ、両指標の関係性を示す可能性がある。しかし、被験者間で相関の有無が異なっており、今回設計した指標がMoSとの関係性がほとんどであるとは言いきれない。また、λ_Lにおいては相関がほとんどみられなかった。またパターンごとのλについてはB, D, Eの3パターンまたはA, F, Gの3パターン同士で強い正の相関がみられた。選択された入力データの組み合わせが似たものでこの傾向がみられた。パターンCは特に長期のリアブノフ指数について前進および横方向において、他のパターンとの相関が強い。

横方向についても、一部被験者における最安定点と一部のλ_Sとで0.3程度の相関がみられたが、被験者全体には相関はみられず、λ_Lにおいては最安定点、最不安定点のMoSともに相関はなかった。パターン同士での相関は前進方向とおおむね近い傾向を示した。

6 考察

今回設計した状態空間におけるリアブノフ指数は安定性余裕との被験者全体における相関はみられなかった。これは関連研究[5]のMoSとリアブノフ指数の関係性がないという結論と同様であった。一方で、一部被験者においては前進方向の最不安定点のMoSにおいて、B-Eのパターンにおいて、0.5-0.6程度の相関がみられた。これらのパターンは、選択された状態変数の数が少ないことから、各入力データ間の位相差が指標に反映されやすく、力学的な安定性余裕を反映したのと考えられる。加えて、次元数及び入力データの組み合わせが似ているもの同士は強い相関がみられた一方で、組み合わせによって指標同士の相関がみられないものもあり、各指標は異なるものになることから、入力データの組み合わせの選択は重要であり、状態変数の組み合わせの選択について、今後も検証していく必要がある。

7 結言

歩行支援機器による安定性の向上の効果を計測、計算容易な形で示すために小型、軽量のIMUの加速度データによる安定性余裕と相関のあるリアブノフ指数を基にした歩行安定性評価指標の

開発を目指し、時系列データから作られる状態空間を構成するパラメータを変更し、リアプノフ指数を計算した。また、歩行実験にて、新指標の計算および解析を行った。

全体的な MoS とリアプノフ指数 λ との相関はみられなかったものの、一部被験者においてはやや強い相関がみられたことから、両指標の関係性を検証する上で、さらなる状態空間の構成方法について検討する必要がある。被験者数、試行数が十分とは言えないため、今後も同様の実験を行うなどして両者の関係性を検証していく必要がある。加えて、各条件にて複数の歩行パラメータが変化していたため、それぞれ新指標に与える影響を統計学的な検定を行って検証する必要がある。

参考文献

- [1] 内閣府 令和元年版高齢社会白書
- [2] M.T. Rosenstien , J.J. Colins, C.J.D. Luca, "A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets", *Physica D*, Vol.65, pp. 117-134, 1993.
- [3] S.M. Bruijn, Jaap H. van Dieen, Onno G. Meijer, Peter J. Beek., "Is slow walking more stable?", *Journal of Biomechanics*, Vol.42, pp. 1506-1512, 2009.
- [4] A.L. Hof, M.G.J. Gazendam, W.E. Sinke, "The condition for dynamic stability", *Journal of Biomechanics*, Vol.38, pp753-758, 2005.
- [5] Laura Hak, Han Houdijk, Peter J. Beek, Jaap H. van Dieen, "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*, Vol. 8, Issue 12, 2013.

Table 2 Correlation among parameters of result of MoS and λ (forward direction).

	MoS_{max}	MoS_{min}	λ_{SA}	λ_{LA}	λ_{SB}	λ_{LB}	λ_{SC}	λ_{JC}	λ_{SD}	λ_{LD}	λ_{SE}	λ_{LE}	λ_{SF}	λ_{LF}	λ_{SG}
MoS_{min}	0.57														
λ_{SA}	0.04	0.28													
λ_{LA}	-0.04	-0.02	0.16												
λ_{SB}	-0.08	-0.11	0.01	0.26											
λ_{LB}	0.04	0.11	0.02	0.53	0.50										
λ_{SC}	-0.15	-0.10	0.50	0	-0.34	-0.37									
λ_{JC}	0	0.05	0.03	0.69	0.46	0.87	-0.26								
λ_{SD}	-0.13	-0.07	0.24	0.28	0.89	0.47	-0.17	0.45							
λ_{LD}	0.06	0.15	0.07	0.55	0.52	0.96	-0.35	0.87	0.50						
λ_{SE}	-0.08	-0.04	0.03	0.23	0.91	0.54	-0.40	0.49	0.88	0.55					
λ_{LE}	0.04	0.10	0.02	0.52	0.49	0.92	-0.33	0.86	0.46	0.93	0.52				
λ_{SF}	0.02	0.19	0.88	0.22	0.23	0.09	0.43	0.11	0.35	0.14	0.19	0.10			
λ_{LF}	-0.04	-0.03	0.17	0.99	0.27	0.56	0.01	0.70	0.29	0.57	0.24	0.53	0.23		
λ_{SG}	0.04	0.26	0.97	0.20	0.05	0.04	0.51	0.05	0.25	0.10	0.03	0.04	0.94	0.21	
λ_{LG}	-0.03	-0.02	0.16	0.99	0.26	0.54	0	0.70	0.28	0.56	0.23	0.52	0.22	0.99	0.20

Table 3 Correlation among parameters of result of MoS and λ (lateral direction).

	MoS_{max}	MoS_{min}	λ_{SA}	λ_{LA}	λ_{SB}	λ_{LB}	λ_{SC}	λ_{JC}	λ_{SD}	λ_{LD}	λ_{SE}	λ_{LE}	λ_{SF}	λ_{LF}	λ_{SG}
MoS_{min}	-0.07														
λ_{SA}	-0.22	-0.10													
λ_{LA}	-0.09	-0.03	0.24												
λ_{SB}	-0.09	0.10	0.23	0.14											
λ_{LB}	-0.08	0.01	0.17	0.46	0.31										
λ_{SC}	-0.07	-0.05	0.78	0.16	0.27	0.14									
λ_{JC}	-0.11	0	0.16	0.76	0.30	0.72	0.10								
λ_{SD}	-0.18	0.06	0.41	0.19	0.87	0.37	0.37	0.36							
λ_{LD}	-0.10	0.01	0.16	0.50	0.31	0.92	0.13	0.74	0.38						
λ_{SE}	-0.06	0.10	0.09	0.14	0.76	0.31	0.03	0.31	0.67	0.28					
λ_{LE}	-0.08	0.03	0.04	0.59	0.40	0.74	0.02	0.83	0.39	0.76	0.39				
λ_{SF}	-0.21	-0.09	0.96	0.28	0.31	0.21	0.78	0.21	0.47	0.21	0.15	0.09			
λ_{LF}	-0.09	-0.03	0.25	0.98	0.14	0.46	0.16	0.75	0.19	0.48	0.15	0.57	0.28		
λ_{SG}	-0.19	-0.12	0.98	0.24	0.20	0.17	0.81	0.14	0.37	0.15	0.03	0.03	0.96	0.24	
λ_{LG}	-0.08	-0.02	0.23	0.99	0.14	0.46	0.15	0.76	0.20	0.49	0.15	0.58	0.27	0.98	0.23