

# 加速度計測による高齢者歩行の安定性評価と 転倒予防に関する研究

東北大学大学院	猪岡	光
(共同研究者) 同	石原	正
同	小野	貴彦
同	大瀧	保明
同	永富	良一

## Study on Stability Assessment of Elderly Walking Utilizing Portable Accelerometry Aimed at Fall Prevention

by

Hikaru Inooka, Tadashi Ishihara, Takahiko Ono

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University*

Ryoichi Nagatomi

*Graduate School of Medicine, Tohoku University*

Yasuaki Ohtaki

*Graduate School of Engineering, Tohoku University*

### ABSTRACT

Falls due to locomotive impairment cause a serious hazard to elderly people. Impaired mobility due to injuries or a fear of falling can diminish a person's ability to perform activities of daily living. Aging effects on the sensory feedback has been hypothesized to be a key factor in adjusting posture to maintain balance against unpredictable external or internal irregularities during walking. Conventionally, clinicians perform posture balance assessments using subjective or quantitative testing, which are mostly focused on quantifying regional amount of kinetic parameters, i.e. region of body sway, variability or geometrical characteristics of motion. However, a measure of variability does not

correspond to the sensitivity of the neuromuscular control. This study addresses a quantitative evaluation of personal locomotive ability in terms of stability employing on-linear dynamical analysis. Main objective of this study is to present a reliable technique to assess dynamic stability of walking utilizing a portable accelerometer. Straight level walking of young and elderly subjects was investigated in the experimental study. Elderly subjects generally tended to exhibit higher value suggesting they were less dynamically stable. Significant individual variations were also observed among the elderly subjects, which in part could be explained by their physical conditions. Subjects with higher value were suffering knee pain or had histories of leg fracture, while the subjects with lower value had frequent exercise habit in daily life. Similar tendencies were also found with other direction of acceleration, but not as remarkable as with lateral direction. The experimental results suggested that the present technique might be useful in estimating walking stability and personal risk of falls. This method is easily applicable and reliable in daily living environments and situations. Further application of the present technique may help predicting personal risk of falls.

## 要 約

高齢者の歩行の特徴として運動の不規則性が報告されている。運動の不規則性は神経筋骨格系の協調の不具合を反映していると考えられるが、そこに内在する制御メカニズムの動的な性質を評価できれば、歩行安定性や転倒のリスクを評価するうえで有効である。われわれは、検診の現場でも容易に使用可能であり、歩行の安定性をより解析的に評価するための新しい方法を提案した。小型の加速度計測装置を腰部に装着し、歩行中の体幹動揺を計測した。得られた加速度時系列データに対して非線形時系列解析を行い、リャプノフ指数の推定を行って歩行の動的安定性を評価した。若年者と高齢者を被験者として実験を行い、運動習慣や関節痛の有無により比較を行った。全体的傾向として、高齢者は若年者よりも動的安定性が低いことを示したが、高齢者でも高い運動習慣を持つ被験者は若年者と同程度の高い安定性を有していた。また、関節痛の有無によっても安定性に差を生ずる結果を得た。以上の結果から、高齢者個

人ごとの歩行安定性の診断や運動訓練等介入の効果の定量化に有効な手段となり得ることが示唆された。

## 緒 言

高齢者と社会にとって真に豊かな長寿社会のためには、長くなった寿命を心身に障害がない自立した状態で暮らすことができる「健康な長寿」を実現していくことが重要である。しかしながら、これを阻害しているもののひとつに、高齢者の移動と転倒の問題がある。例えば、高齢者の大腿骨頸部骨折の90%は転倒によって生ずるといわれている。このような骨折に至るケースでは、障害が長期に及び、たとえ転倒による外傷が完治した後でも、恐怖心から外出を避けるようになり「閉じこもり」あるいは「寝たきり」につながるものが指摘されている<sup>1)</sup>。

転倒を未然に防ぐためには、障害物を排除するなどの環境整備は勿論であるが、転倒に至る以前の歩行の状態から転倒に結びつく機能的要因を的確に捉え、転倒に係る個人の歩行能力と運動訓練

などによる介入の効果を定量的に評価することが必要である。そのためには、検査、検診の場でも容易に実施可能であり、運動の持続性と安定性について解析的に評価が行える方法が求められる。

「歩行安定性」は歩行を達成するうえで最も重要な要素のひとつであるが、その解釈や定量化の手法は多様である。近年、特別な計測環境を必要とせずに簡便に使用できる小型装置として、加速度センサの高度な利用が提案されている<sup>2~4)</sup>。これまでも、歩行の不規則性を捉えて定量化する試みが行われており、医学的な診断所見との相関性から歩行安定性の評価に有効であることが示されている<sup>5)</sup>。また、鶴岡らは Auto Regressive モデルにより歩行リズムのスペクトル解析を行い、安定歩行におけるフィードバックに言及している<sup>6)</sup>。一方で、Hurmuzlu や Digwell らは、非定常な挙動にみられる非線形現象に着目し、力学系の定常平衡状態への収束性の観点から歩行の動的安定性を評価する方法を提案している<sup>7,8)</sup>。とくに Digwell らは、歩行に係る力学系から動的システムの状態の時間発展をリャプノフ指数により定量化することにより、歩行の動的安定性を評価する方法を示している。高齢者の不安定歩行の特徴としても、運動の不規則性が報告されている。そこに内在する制御メカニズムの動的な性質を踏まえた評価が行えれば、加齢と歩行能力の関係や歩行安定性の評価を行う上で有用である。

本研究では、簡便に計測可能な歩行中の体幹動揺から高齢者の歩行の動的安定性を評価することを試みた。体幹動揺を3軸加速度センサと記録装置を内蔵した携帯型装置を用いて計測し、計測波形に対して多次元の最大リャプノフ指数の推定を行うことにより歩行安定性の評価を行った。65歳以上の高齢者と若年者を被験者として歩行実験を行った。高齢者の歩行安定性評価における手法の有用性について検討したので、以下に報告する。

## 1. 実験方法

被験者は健常若年者14名(23.4 ± 3.3歳)、および高齢者20名(68.4 ± 5.1歳)である。実験に先立ち、問診により被験者の体調、運動習慣、既往症等の調査を行った。高齢者のほとんどは仙台市シルバーセンターで実施されている「健康運動教室」の参加者であるが、日ごろの運動量、転倒経験、関節痛の有無などは様々である。東北大学体育館内に50mの直線歩行路を設けた。歩行の速度は拘束せずに、被験者の主観で通常と思われる速度で歩行した(自由歩行)。被験者の服装は普段着とし、内履きを使用した。研究の趣旨を十分に説明し、実験に対する被験者の同意を得た。

歩行の状態は体重心の挙動に集約されることを考慮し、体幹の動揺(上下、左右、前後の3方向)を3軸加速度センサ(±2G)により計測した。図1に装置の取り付けの様子を示す。装置はマジックテープ式のベルト型サポーターを用いて腰背部中央に密着するように固定した。装置には3軸加速度センサが記録装置とともに内蔵されており、寸法は70×85×15mm、重量は100gと小型軽量である。サンプリング周波数は100Hzである。データは内蔵のCompact Flashカードに記録される。

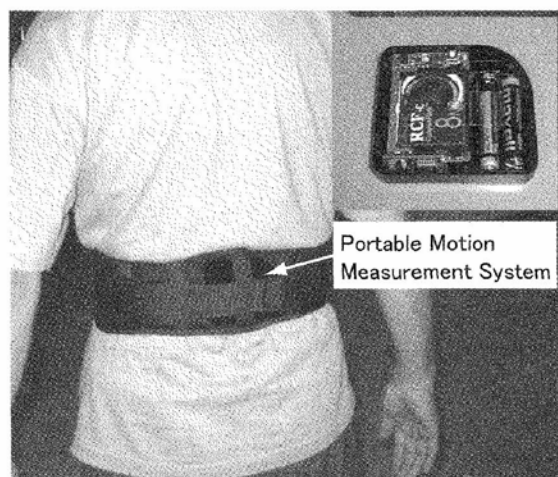


図1 View of a subject wearing the portable instruments. Three-dimensional (lateral, vertical, anteroposterior) accelerations during walking are measured.

すべての実験が終了後、計測データをパーソナルコンピュータにダウンロードし、オフラインで解析を行った。

## 2. 解析方法

リャプノフ指数 (Lyapunov exponent) は力学系のアトラクタが示す軌道不安定性を定量化する指標である。アトラクタとは、力学系の状態空間内における漸近的な振る舞いをいう。リャプノフ指数が大きい値であれば状態空間におけるアトラクタの発散を意味し、摂動に対する系の感度の直接的な尺度となる。計測により得られる時系列データでは、元の力学系そのものが未知である。そこで、リャプノフ指数を時系列データから直接的に求める方法としてアトラクタ軌道間の伸張を計算し、そこからリャプノフ指数を推定する方法を用いる<sup>9)</sup>。

はじめに、計測された時系列の加速度データから、状態空間におけるアトラクタを再構成する。図2に示すように、時系列から時間遅れ座標系へ変換する方法を用いた。ある観測された1変数の時系列データを

$$\{x(t) | t=1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

としたとき、時刻  $t$  の状態  $x(t)$  を起点とし、そこからある一定の時間遅れ  $\tau$  ごとに  $d-1$  個のサン

プリング点を選び出し、それらを組にした状態ベクトル

$$y(t) = (x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (d-1)\tau)) \quad (2)$$

を  $d$  次元の状態空間内に埋め込む。これを全てについて行うことにより、アトラクタを再構成する。ここで、時間遅れ  $\tau$  は自己相関関数が最初に  $1/e$  ( $e$  は自然対数) となる時刻を最適な時間遅れ値として決定する方法を用いた。また、埋め込み次元  $d$  は、誤り近傍法 (False near neighbors method) により推定した。いずれの被験者においても  $d=4$  程度で漸近が確認されたため、埋め込み次元は一律に4次元として解析を行った。

リャプノフ指数はアトラクタの近傍軌道の指数的な拡大率を定量化する。すなわち、近傍軌道間の初期変位 (ユークリッド距離)  $D(0)$  が  $\Delta t$  後に  $D(\Delta t)$  に拡大した場合、この軌道のずれの指数的な拡大率  $\lambda$  がリャプノフ指数である。

$$D(\Delta t) = D(0)e^{\lambda \Delta t} \quad (3)$$

リャプノフ指数の算出アルゴリズムはいくつか提案されているが、本研究では Kantz の方法<sup>10)</sup>を用いた。Kantz の方法では、アトラクタ軌道の各点  $y(t)$  に対して、 $y(t)$  を中心とする微小半径  $\epsilon$  の  $d$  次元空間内の超球 (以下  $\epsilon$  球とする) を考え、これに含まれる近傍軌道上の点  $y(t_i)$  を  $M$  個 ( $i=1, 2, \dots, M$ ) 選び出す。ただし、最近傍点

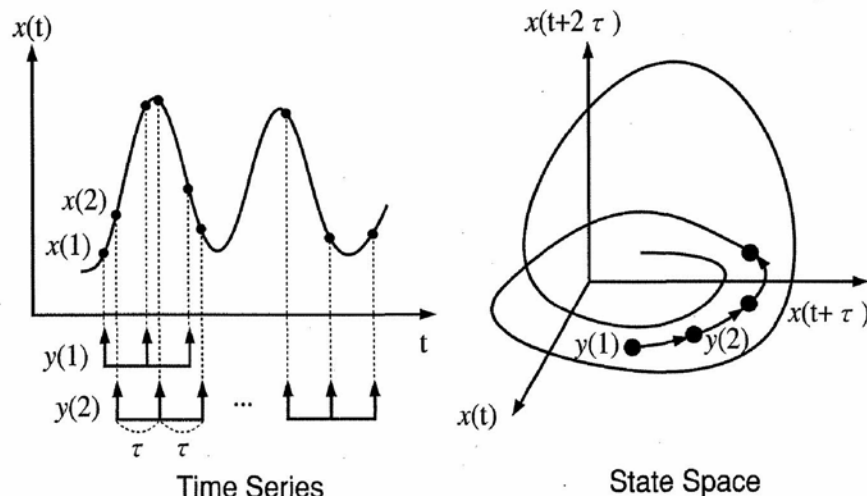


図2 Reconstruction of an attractor trajectory in the state space (in case of the embedding dimension  $d=3$ )

同士は時系列データの平均周期以上離れていることとする。  $y(t)$  から見た  $\epsilon$  球内の  $M$  個の点  $y(t_i)$  に対する変位ベクトル  $D_i(t) \in R^d$  は、

$$D_i(t) = y(t_i) - y(t) \quad (4)$$

である。次に、時間が  $\Delta t$  だけ経過した後を考えると、 $\epsilon$  球の中心  $y(t)$  は  $y(t + \Delta t)$  に、 $\epsilon$  球内の各点  $y(t_i)$  は  $y(t_i + \Delta t)$  に、それぞれ変化する。このとき、

$$S(\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left[ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|D_i(t + \Delta t)\| \right] \quad (5)$$

を計算し、 $\Delta t$  対  $S(\Delta t)$  の線形近似直線の傾きとして多次元の状態空間の最大リャプノフ指数  $\lambda$  を推定する。計算には試技ごとの計測データを直接利用し、フィルタ処理は行わないこととした。計算プログラムは MATLAB (MathWorks) で構成した。

### 3. 結果

計測結果の一例として、図3に歩行中5秒間の加速度波形を示した。実線は若年者を、破線は高齢者を示している。高齢者は若年者に比べて振幅が小さく、一歩ごとの波形の再現性が低下する傾向が認められた。加速度波形から足部の接地時点を検出し、歩行周期を特定した。足部の接地時点は加速度波形中の急峻なピークから検出可能である。

接地時点と歩行路長の情報から、ステップ数、歩行周期 (sec/step)、ステップ長 (m/step)、歩行速度 (m/sec) を求めた。表1に若年者群と高齢者群の歩行因子を示した。高齢者群の平均歩行速度は若年者に比べて低下する傾向が認められた。

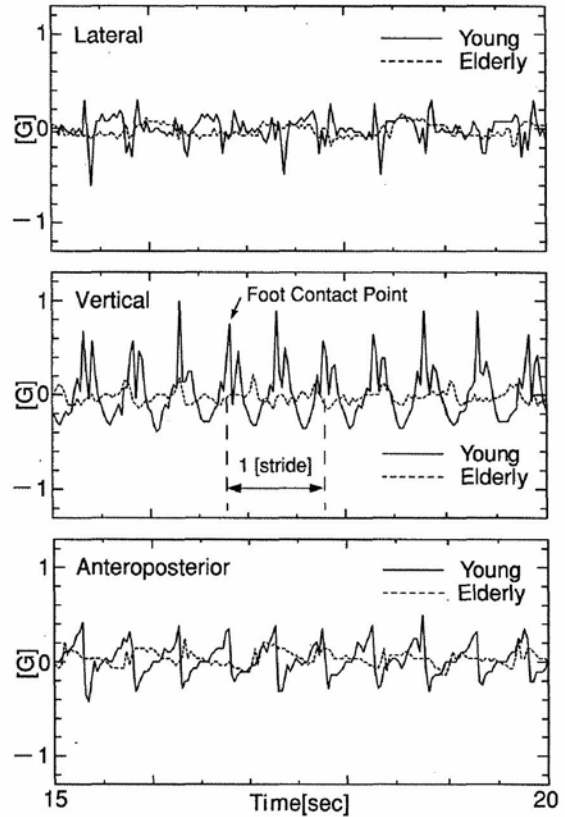


図3 Typical example of acceleration as measured in young and elderly gait

また、高齢者を関節痛の有無により2群で比較すると、関節痛のない被験者群に比べて、関節痛を有する高齢者群は歩行速度が低下する傾向が認められた。

歩行開始と停止時の過渡区間3歩を除外し、残りの歩行区間を解析データとしてリャプノフ指数の推定を行った。リャプノフ指数はその値が高いほど動的安定性が低いことを示し、躓きなど予期せぬ摂動が加わった場合の回復力が低いことを示唆する。

図4にリャプノフ指数の計算結果を示した。体幹動揺の左右、上下、前後それぞれについて、若

表1 Average value of the basic gait factors of young and elderly subjects. Standard deviation was given in parenthesis

Subject	Age[yr]	Gait cycle [sec/step]	Step length [m/step]	Velocity[m/sec]
Young	23.4 (3.34)	0.52 (0.03)	0.75 (0.04)	1.43 (0.07)
Elderly All	68.4 (5.1)	0.49 (0.02)	0.68 (0.07)	1.38 (0.15)
Joint pain	68.5 (5.7)	0.48 (0.02)	0.66 (0.07)	1.36 (0.16)
No joint pain	68.1 (5.1)	0.50 (0.02)	0.71 (0.05)	1.43 (0.13)

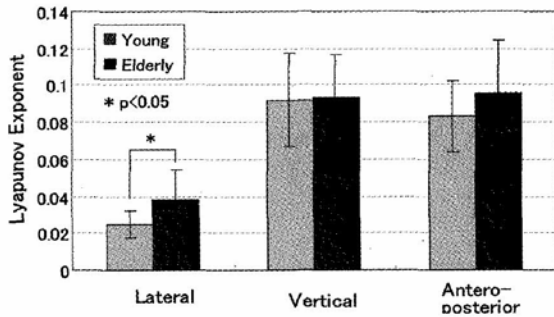


図4 Comparison of Lyapunov exponents between young and all elder subjects

年者群と高齢者群に分けてリャプノフ指数の平均値を表示した。全体的な傾向としては、高齢者群は若年者群に比べて、若干ではあるが高い値をとる傾向が認められた。とくに左右方向では有意な差が認められた ( $p < 0.05$ )。若年者群と高齢者群で明確な差を生じなかったのは、今回参加した高齢者の多くが運動教室参加者であり、比較的体力的に優れた集団であったため考えられた。

しかしながら一方で、個人ごとに結果を見てみると、高齢者群では被験者個々に大きな差を生じていた。図5に、左右方向についての、被験者個々のリャプノフ指数を示した。これらのリャプノフ指数の推定結果と問診の結果と照らし合わせた結果、リャプノフ指数の値が大きい高齢者 (No.4,9,17,18) は下肢に関節痛を申告していた。関節痛のない高齢者のなかでも、とくに高い運動

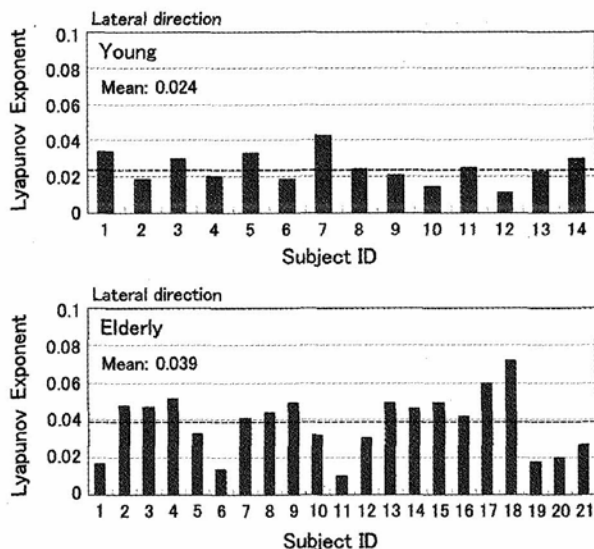


図5 Lyapunov exponents of young subjects (top) and elderly subjects (bottom) during walking. Average values in each group are shown in broken line.

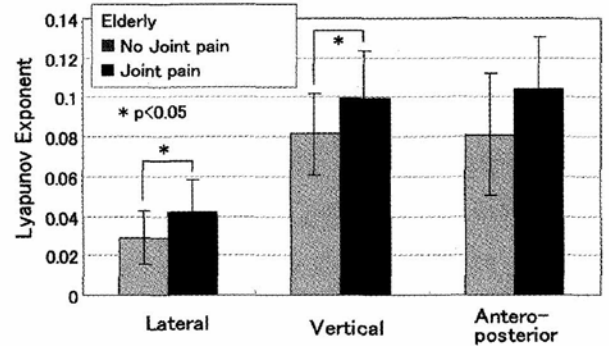


図6 Comparison of Lyapunov exponents between elder subjects having joint pain and no joint pain

習慣がある被験者 (No.1,6,11,19) では、若年者と同程度に指数の値は小さく動的安定性に優れていた。

高齢者を関節痛の有無により2群に分けてリャプノフ指数を比較した。図6に、高齢者-関節痛なし (7名  $68.5 \pm 5.7$  歳)、高齢者-関節痛あり (13名  $68.1 \pm 3.9$  歳) のリャプノフ指数を示す。左右、上下方向加速度で関節痛のある群はない群に比べて有意に高い値を示した ( $p < 0.05$ )。若年者と関節痛のない高齢者では顕著な差は認められなかった。

以上のように、提案した手法により加齢や関節痛の有無、また運動習慣などにより生ずる動的安定性の差異を明示することができ、転倒のリスクを評価する上での、程度指標としての有用性が示唆された。本手法は、あくまでも周期性のある一連の歩行運動を前提としているため、検査としては、各種条件を整えた場所での直線歩行に限定される。しかしながら、10歩行周期以上あれば十分に解析が可能なので、一般的に行われている歩行テストで行えるような簡便なプロトコルで実施可能であると思われる。

今後、被験者数を増やすとともに、姿勢調節に関連する筋力や運動能力、関節可動域など他の運動要素、体力的要素との関連を明らかにしていく予定である。とくに、加齢による歩調、歩行速度の低下は膝伸展トルク等の下肢筋力の低下と有意に相関することを踏まえ<sup>11)</sup>、下肢筋力と歩行の



動的安定性の関連性について検討する必要がある。

## 5. 結 言

本研究では、簡便に計測可能である体幹の動揺を携帯型の加速度計測装置を用いて計測し、リヤプノフ指数の推定により、高齢者の歩行安定性を評価した。高齢者と若年者、また、関節痛の有無や運動習慣の異なる被験者で比較を行った。高齢者でも高い運動習慣を持つ被験者は若年者と同程度の高い動的安定性を持つこと、関節痛の有無によっても安定性に差を生ずることを示した。以上より、高齢者個人ごとの歩行安定性の診断や運動訓練等の介入の効果の定量化に有効な手段となり得ることが示唆された。

とくに転倒予防を目的とした運動訓練において、訓練前後に安定性指標がどのように変化するかは大変興味深い。改善がみられるようであれば、安定性の評価方法としての有用性がさらに高くなるのみならず、訓練プログラム自体の適否が判定可能になることが期待される。

## 謝 辞

実験にご協力いただいた仙台市シルバーセンターに謝意を表します。また、研究の遂行にご尽力くださいました飯島佳之氏（富士通）、ムハマドアリフ博士（東北大学大学院情報科学研究科）に謝意を表します。

## 文 献

1) B. E. Maki, Holliday, P. J., Topper, A. K., Fear of

falling and postural performance in the elderly, *Journal of gerontology: Medical sciences*, 46, 123-131 (1991)

- 2) 佐川貢一, 伊奈淳, 高橋隆行, 石原正, 猪岡光, 加速度および大気圧を利用した人間の移動形態の推定, 計測自動制御学会論文集, 35, 2, 184-190 (1999)
- 3) S. Miyazaki, Long-term unrestrained measurement of stride length and walking velocity utilising a piezoelectric gyroscope, *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 44, 8, 753-759 (1997)
- 4) K. Aminian, K. Rezakhanlou, E. D. Andres, C. Fritsch, P. F. Leyvraz, P. Robert, Temporal feature estimation during walking using miniature accelerometers: an analysis of gait improvement after hip arthroplasty, *Medical & biological engineering and computing*, 37, 686-691 (1999)
- 5) 関根正樹, 阿部芳幸, 田村俊世, 戸川達男, “3軸加速度センサを用いた片麻痺患者に対する歩行評価法の検討”, 第39回日本ME学会大会 Japan Soc. ME & BE (2000)
- 6) 鶴岡政子, 水口俊介, 鶴岡百合子, “中高年齢者の歩行におけるリズムとゆらぎ現象に関する研究”, *デサントスポーツ科学*, 23, pp.209-215 (2002)
- 7) Y. Hurmuzlu, C. Basdogan, “On the measurement of dynamic stability of human locomotion”, *Journal of Biomechanical Engineering*, 116, 30-36 (1994)
- 8) J. B. Dingwell et al, “Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous overground walking”, *Journal of Biomechanics*, 33, 1269-1277 (2000)
- 9) 合原一幸, “カオス時系列解析の基礎と応用”, 産業図書 (2000)
- 10) H. Kantz, T. Schreiber, “Nonlinear Time Series Analysis”, *Cambridge University Press* (1999)
- 11) 淵本隆文, “高齢者の歩行能力に関する体力的・動作学的研究 (第2報) - 膝伸展, 足底屈, 足背屈の筋力と歩行能力の関係 -”, *体育科学フィットネス向上の科学*, 28, 108-115 (1998)