

高齢者の歩行機能診断を目的とした運動特徴量計測

大野 尚則[†] 奥谷 知克[‡] 藤井 優武^{††}

現在、歩行機能診断を実施する際、運動能力とバランス能力に関する検査が行われている。特にバランス能力の検査には高価な重心動揺計が用いられていることなどから、その診療報酬は高額となり、年金生活の高齢者にとっては大きな負担となっている。本研究では、介護施設や家庭で利用できる安価かつ簡便な装置を念頭に、歩行運動安定性やリハビリ効果を確認できるシステムの実現を目指す。そして高齢者の歩行機能診断を目的とした運動特徴量計測方法について提案する。また本報告では、評価実験の結果として、加齢や歩行障害の有無に起因する運動特徴量の差異を確認し本手法の有用性を示した。

Measurement of Motion characteristics for the Diagnosis of the Elderly walking function

NAONORI OHNO[†] TOMOKATSU OKUYA[‡] MASATAKE FUJII^{††}

Currently, force plates are used when diagnosing walking ability, observing the stability of walking movements and diagnosing the effects of rehabilitation from the level of stability. However, force plates are costly and medical treatments that use them are expensive, becoming a heavy burden to senior citizens living on their pensions.

For our research, we will produce a prototype force plate and analysis system using low cost sensors with the goal of creating a low cost and simple system which can check the stability of walking movements and the effects of rehabilitation that can be used in nursing homes and personal residences. In our experiments, we will analyze the features of the walking movements of both senior citizens and non-senior citizens and detect the unique differences to verify the prototype's effectiveness.

1. はじめに

歩行機能診断を実施する際、運動能力とバランス能力を把握することが必要である。現在、6分間歩行検査や歩行計データを用いた運動能力の検査が行われ、また重心動揺計を用いてバランス能力の指標となる重心安定性の検査を行い、これらを総合して歩行機能やリハビリ効果を診断している。しかしながら、各々の検査項目に対して高価な医療機器とデータ分析作業が必要となるため、歩行機能診断を行う場合、結果的には経済的な負担となっている。

バランス能力を検査する方法として通常、重心動揺計が用いられる。この装置上において受診者の直立不動時の重心の移動情報を基に面積・軌跡長検査やラバ

ー負荷検査を行い、その結果を健常者の統計的データと比較して異常の有無を判断している。この方法では微小なバランスのぶれを抽出することが求められることから、使用される重心動揺計は高精度・高感度な荷重センサを具備し、床を伝搬するノイズ対策がなされているために高価な装置となっている。

また、歩行時の運動能力を検査するための6分間歩行や、加速度センサ等を用いて歩行状況を自動的に計測する歩行計を使った検査については、単位時間あたりの歩行距離や時間を求め、健常者の統計データとの比較や、治療経過に対する相対的な数値比較により、運動能力やリハビリ効果を判断している。しかしながら、検査環境や装置は必ずしも標準化されておらず、測定条件も異なることが多い。また、数値データ自体が体調や気分が大きく影響されることから、臨床的に運動能力を判断するための定量的なデータとして用いることは難しい。

そのため筆者らは診断コスト（ハード製造コスト、データ分析コスト）の低減を目的とし、歩行機能を診断する新しい手法の確立と、介護施設や一般家庭において高齢者の利用を想定した安価で簡便な診断装置の開発を進めている。本稿では、歩行機能の診断を前提

[†] 岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

[‡] 株式会社デンソーアイティラボラトリ／独立行政法人国立長寿医療研究センター

Denso IT Laboratory, Inc. & National Center for Geriatrics and Gerontology

^{††} 株式会社ブイ・アール・テクノセンター

VR Techno Center, Inc.

とした時系列カオス解析による足踏み運動時の運動特微量計測手法について提案し、試作システムを用いた実験により抽出された運動特微量の解析結果について報告する。

2. 関連研究

2.1 高齢者の身体能力の測定手法

先述した歩行機能検査方法のほか、現在、身体能力を測定するために様々な取り組みが行われている。例えば、高齢者等が自立して生活するための身体的活動能力を「生活体力」として評価する方法¹⁾が挙げられる。この方法では起居・歩行・手腕作業・身辺作業・総合動作として特定の動作をさせ、その結果を統計的に求められた同年代の平均値と比較することで、年齢別に5段階で評価している。このように現在行われている取り組みでは身体機能の診断よりも体力を基準に能力を評価しているものが多い。

木村²⁾は静止立位制御について自律神経の関与について検証を行い、若年層と高齢者の相違点が自律神経の機能低下が1つの要因である可能性を新たに示した。しかしながら、本来、自律神経は人の生理的なパラメタを調整するなど不随意なものであり、本研究で議論している特定運動のための身体機能に関して自律神経を基に評価することは容易ではない。また、猪飼³⁾は足踏み運動を重心動揺計により計測し一定時間内の最大歩数や足圧中心軌跡を観察することにより、バランス機能検査が可能であることを示したが、その運動特微量の定量的な測定には至っていない。

2.2 生体ゆらぎによる計測手法

生体ゆらぎとは、主に呼吸変動と動脈圧変動が自律神経を経由して、臓器や筋肉など生体内外を制御するための運動神経上に現れる一見不規則な波形変動である。脳波や心拍の信号を用いた生体ゆらぎの研究が盛んになされるようになり、臨床医学研究により生体ゆらぎの強弱変化や間隔変化の傾向が脳前頭葉の認知機能部の活性度合に比例することが公知となった⁴⁾。また生体ゆらぎを用いて脳活性度を評価することで、認知機能だけでなく長期的な加齢変化の定量化も可能となった⁵⁾。

近年、これらの研究をベースにして生体ゆらぎと身体能力との関連性に関する研究がなされるようになった。横山⁶⁾はフォースプレート等のデータを用いて歩行動作から生体ゆらぎ（歩調ゆらぎ）を観測し、この生体ゆらぎで確認できる身体能力はタスク依存型であるが、身体能力の劣化との相関があることを示し

た。また、奥谷⁷⁾は高齢者ドライバのアクセルとブレーキの足踏み運動（ペダル操作量）から観測された生体ゆらぎは認知機能と高い相関関係にあることを示し、運転能力を定量的に判断するための有効な手段であることを示唆した。

そこで本研究では、足踏み運動中に発生するタスク依存型の生体ゆらぎを計測するため、重心動揺計の重心移動情報を使って時系列カオス解析を行い、生体ゆらぎの影響による非線形性と決定論的性質を抽出し、これらを運動特微量とする手法を提案する。

2.3 時系列カオス解析による計測手法

足踏み動作時の足踏み位置やその荷重は、時間と共に複雑に変化し、そのデータは非線形の時系列データとして計測可能である。しかしながら、計測環境の影響によるノイズや被験者の年齢、体調など生体的な影響も加わることから、その複雑な挙動を詳細に解析することは容易でない。

時系列カオス解析手法は、現実世界の複雑で不規則な時系列信号から、決定論的性質を単純な非線形信号モデルとして導き出す解析手法である⁸⁾。具体的には、非線形、非定常な波形信号から自己相関性（傾向）を持った力学運動の軌跡を可視化し、その傾向特性を定量化する手法である。この可視化をアトラクタ再構成という。今回の研究ではターケンスの埋め込み定理⁹⁾を使用し、ある一定時間遅れ τ を用いて、時系列データを式(1)により空間ベクトル P としてアトラクタを再構成することとした（図1）。

$$P(t) = (x(t), x(t + \tau), x(t + 2\tau), \dots, x(t + (n-1)\tau)) \quad (1)$$

n : 埋め込み次元数

また、この解析手法では力学系において接近した軌道が離れていく度合いを表す量としてリアプノフ指数

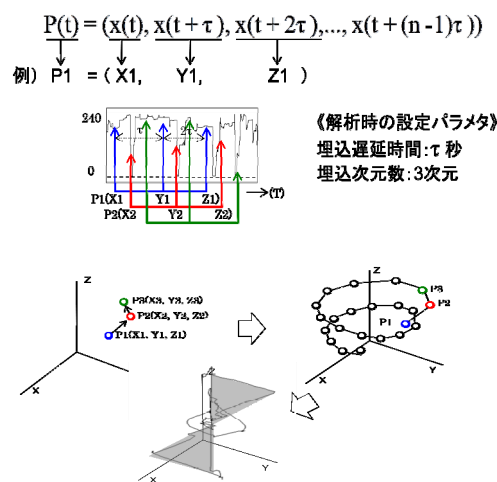


図1 ターケンスの定理によるアトラクタの再構成

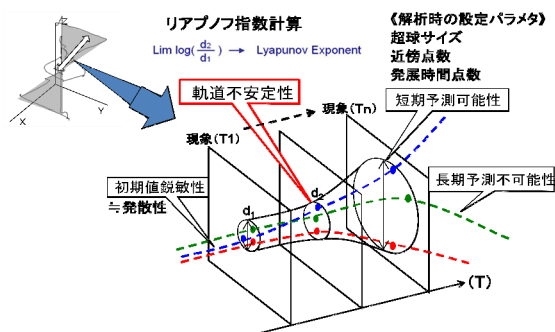


図2 リアプノフ指数の算出

が用いられる (図 2)．本研究ではアトラクタとして表現された時系列データの傾向特性の軌道不安定性の度合いをリアプノフ指数で示すこととする．この計算にはリアルタイム性を考慮した Sano-Sawada 法¹⁰⁾を用い、超球サイズ、近傍点数、発展時間点数をパラメタとしてリアプノフ指数を調整する．本研究ではこの解析手法を使用して足踏み運動の運動特徴量を抽出することを試みる．

3. 足踏み運動による歩行運動特徴量の計測

足踏み運動から歩行機能に関する運動特徴量を定量的に計測する手法について具体的に述べる．

3.1 本研究の手法

本研究で用いる手法を図 3 に示す．これは時系列カオス解析によりアトラクタの再構成とリアプノフ指数の推定を行い、その結果を足踏み運動の運動特徴量とする方法である．その手順として、まず、重心動揺計から得られた足踏み時の重心動揺データから、床平面上の重心移動ベクトルを算出する．通常、重心動揺計とは、直立姿勢時の身体の重心位置を床平面の座標系のデータとして記録する装置であり、左右前後の 4 点に荷重センサを具備した構造となっている．今回、足踏み運動の運動データを収集するために一般的で安価なバランス Wii ボード (任天堂社製、以下 Wii ボード) を採用する．Wii ボードは一般的な重心動揺計と同じく、4 点式の荷重センサを持つ．

次に、得られた重心移動ベクトルの重心動揺計の前後・左右 2 軸の成分の時系列データを使ってアトラクタの再構成を行う．ここでは良好なアトラクタを見つけだすため、ターケンスの埋め込み定理の埋込次元数と埋込遅延時間のパラメタを探索する．見つけだされたアトラクタは足踏み運動時の運動モーメントの傾向特性を視覚的に表現していることとなる．

その後、再構成されたアトラクタの重量の自己相関の不安定性の度合いを示すリアプノフ指数を推定し、

この数値を、脳活性度を示す生体ゆらぎの定量的な指標として用いる．最後に足踏み運動における運動モーメントの安定性を定量的に確認するために、非定常な信号の解析に対して有効であるスペクトル解析手法 DFA (Detrended Fluctuation Analysis)¹¹⁾を用いる．DFA で算出されるスケーリング指数は運動モーメントに起因する歩行の安定性を示す指標となることが報告¹²⁾されており、安定性が高いほど低い値となる．

3.2 予備実験

一般的な重心動揺計と異なり、本実験で使用する Wii ボードは民生用に開発されていることから、得られるデータには、計測時に接地面から伝搬する様々なノイズが含まれている．そのため予備実験として足踏み運動で得られた、ノイズが多く含まれる重心動揺データからのアトラクタ再構成の可否について調べた．

Wii ボードを使用して 30Hz のサンプリングレートで計測した足踏み動作の重心動揺データに対して、アトラクタ再構成のためのパラメタ (埋込次元数と埋込遅延時間) を探索した．その結果、埋込次元数を 4、埋込遅延時間を 30(s)とした場合に、再構成されたアトラクタをある平面上に投影した画像が六角形状となった．アトラクタ再構成に使用した重心移動ベクトルの左右軸成分のパワースペクトルと再構成されたアトラクタを図 4 に示す．この結果から、広い帯域において様々なノイズが多く含まれているデータに対してアトラクタの再構成が可能であることが確認できた．

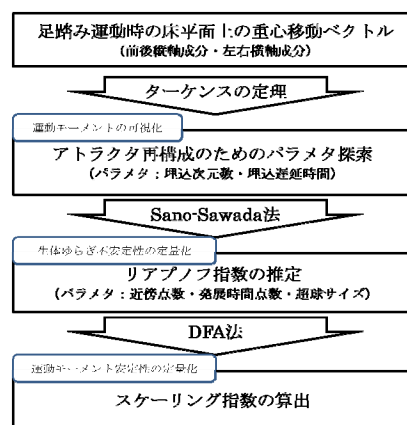


図3 手法の概要

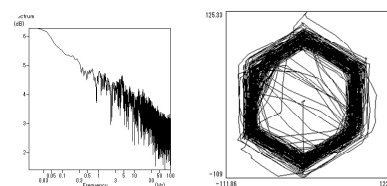


図4 計測データのパワースペクトルと再構成されたアトラクタ

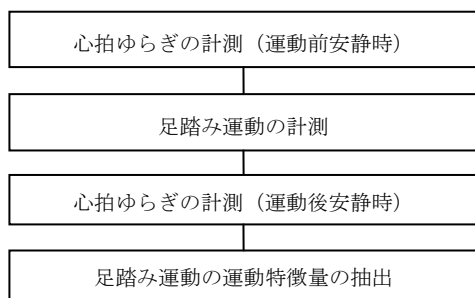


図5 実験手順

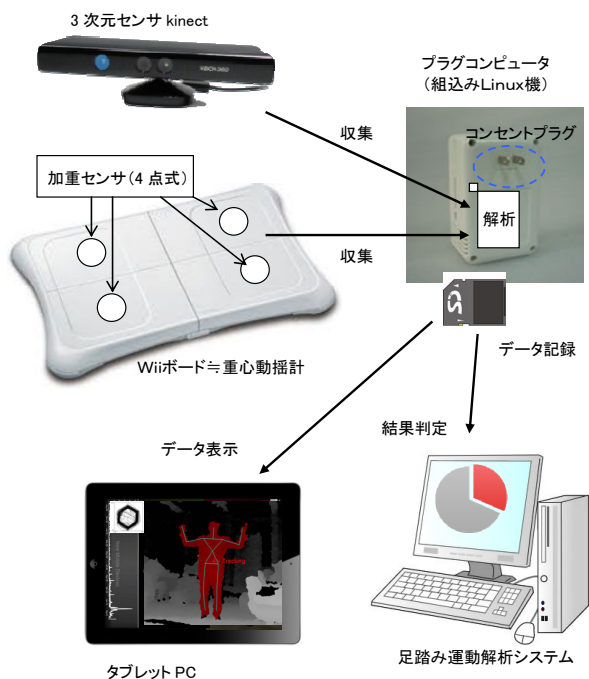


図6 ハードウェア構成

4. 評価実験

Wii ボードから得られた足踏み運動の重心動揺データを提案手法により解析し、再構成されたアトラクタを運動モーメントの安定性、またリアプノフ指数を身体ゆらぎの不安定性（脳活性度）として、足踏み運動の運動特徴量を抽出する実験を行い、年齢との相関を観察し提案手法の有効性を確かめる。

4.1 実験条件

実験手順を図5に示す。まず足踏み運動前の安静時の心拍ゆらぎを計測する。指尖脈波測定解析装置BACS（CCI 社製）を使用し、指尖センサを用いて脈波を椅子に座った状態で3分間計測する。この手順により実験時の被験者の体調等の生理的な状態を把握する。次にWii ボード上で3分間の足踏み運動を行い、足踏み姿勢時の被験者の左右方向をX軸、前後方向

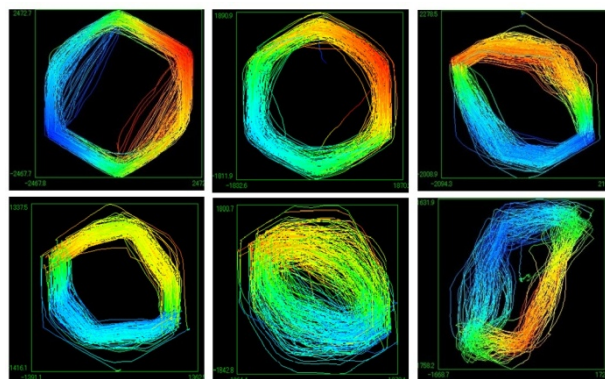


図7 代表的なアトラクタ形状（埋込遅延時間 30(s)）

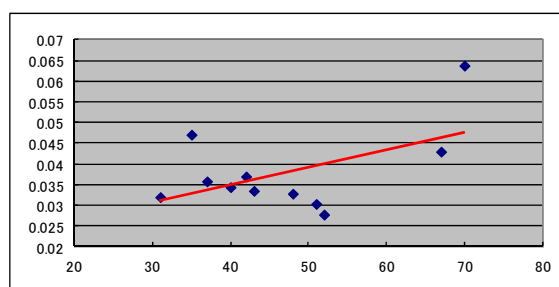


図8 年齢とリアプノフ指数の相関

（超球サイズ:0.1 近傍点数:20）

をY軸とした重心位置データをSDメモリ上に記録する。実験終了後の安静時の心拍ゆらぎも座位姿勢で3分間計測する。実験に使用したハードウェア構成を図6に示す。3次元センサとしてマイクロソフト社製Kinectを使用し、骨格動作データも同時に取得している。アトラクタ再構成はプラグコンピュータにて処理され、SDメモリを介して足踏み運動解析システムにて解析を行う。本システムを使用し、30～70代の被験者13名に対して木質フローリングとカーペット上にWiiボードを設置し実験を行った。

4.2 運動特徴量解析1と結果

得られた重心移動ベクトルのX軸成分とY軸成分それぞれに対し、予備実験で得られたパラメタ（埋込次元数4, 埋込遅延時間30(s)）を用いてアトラクタの再構成を行った。X軸成分についてはアトラクタ形状が再構成できた。その代表的な形状を図7に示す。図7右下に示すアトラクタは脳梗塞半身不随者のものであり、他者の形状とは著しく歪んでいた。その他のアトラクタは歪みながらも六角形状に近いアトラクタ形状となり傾向特性が抽出できた。

また、再構成されたアトラクタから超球サイズ0.10, 近傍点数20, 発展時間点数30として推定されたリアプノフ指数の値を縦軸、被験者の年齢を横軸としたグ

ラフを図 8 に示す。この結果からリアプノフ指数と年齢との相関はなく、加齢とともに発散する傾向がみられることから、このアトラクタ形状は生体ゆらぎの脳活性傾向を示すものではないと考えられる。

4.3 運動特徴量解析 2 と結果

前項の結果を踏まえ、運動特徴量として有効なアトラクタを再構成するため、別のパラメタを探索した。その結果、埋込次元数 4、埋込遅延時間 8(s)の時に重心移動ベクトルの X 軸成分についてはすべての被験者のデータから一様に蝶型のアトラクタが確認された。図 9 は年代毎の代表的なアトラクタ形状である。加齢とともに歪みやぶれが大きくなっている傾向が確認できた。歩行障害を持つ高齢者の足踏み運動から抽出されたアトラクタ (図 9(e)) は著しい歪みが観察できた。

次に X 軸成分の再構成されたアトラクタからリアプノフ指数 (超球サイズ:0.08, 近傍点数:20, 発展時間点数:30) を推定し、年齢との相関をグラフ化した結果を図 10 に示す。強い相関は見られなかったが、加齢するにつれてリアプノフ指数が小さくなる傾向が確認できた。

また再構成されたアトラクタの安定性の指標として DFA によりスケーリング指数を算出した。その結果を図 11 に示す。今回の結果では加齢に伴いスケーリング指標が高くなる傾向が確認できた。

5. 考察と今後の課題

5.1 解析結果について

運動特徴量解析 1 では、ターケンスの埋め込み定理の埋込遅延時間を 30(s)とした場合、重心移動ベクトルの X 軸成分のアトラクタの写像が六角形状となることを確認した。また、ここで得られた脳梗塞半身不随者のアトラクタは著しくひずんでいることから、形状が運動モーメントの安定傾向を示すものであると考えられる。よって、運動特徴量解析 1 で使用したパラメタを用いて解析を行うことにより足踏み運動に関わる整形外科的な異常を視覚的に容易に把握できると考えられる。またこの解析から推定されたリアプノフ指数は加齢との相関がみられなかったため、再構成されたアトラクタ形状は生体ゆらぎの脳活性傾向を示すものではないと判断できる。

次に運動量解析 2 で使用したパラメタ (埋込遅延時間 8(s)) を用いて再構成されたアトラクタ (X 軸成分) はすべての被験者について一様な蝶型となったことから、足踏み運動に関する有用な傾向特性を抽出することができたと考えられる。また再構築されたアトラク

タから推定されたリアプノフ指数と加齢に関して高い相関は観察できなかったが、加齢に伴い低下傾向にあることは確認できた。既に報告されている加齢と生体ゆらぎの相関の傾向と同様な結果が得られており本手法の有効性が確認できたと考える。先述したように既に生体ゆらぎ解析においてリアプノフ指数は脳活性度の不安定性を示す指標となることが報告されており、被験者の母数を更に増やし、アトラクタ形状に近い母集団を用いることにより、年齢とリアプノフ指数の高い相関を示すことができると考える。また、脳活性度と認知能力は相関があることから、提案手法で求められたリアプノフ指数は、認知症を診断するための定量的な指標となり得ると思われる。

更に DFA により算出されたスケーリング指数については加齢に伴い増加する傾向がみられ年齢が高いほ

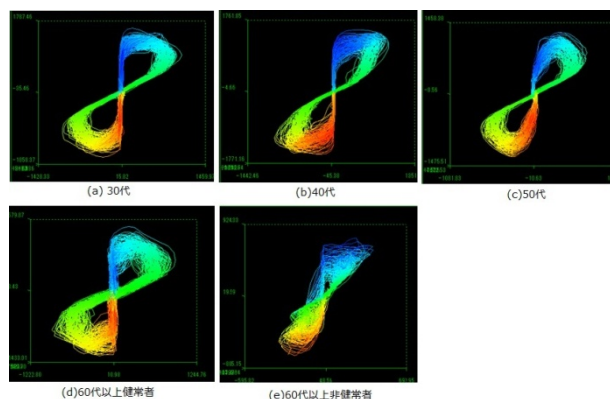


図9 年代別のアトラクタ形状 (X 軸成分, 遅延時間 8(s))

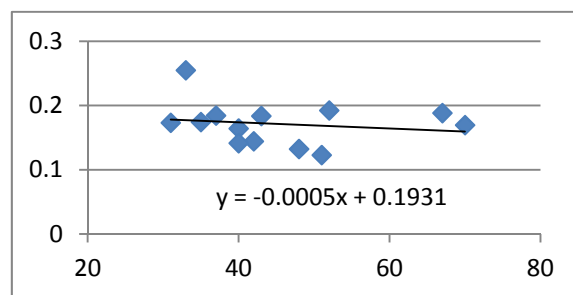


図10 年齢とリアプノフ指数 (X 軸成分) の相関

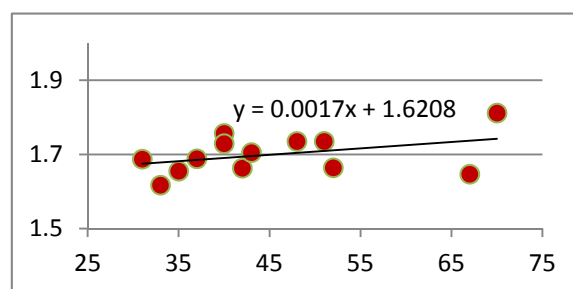


図11 年齢と DFA スケーリング指数 (X 軸成分) の相関

ど整形外科的な運動モーメントのぶれが大きいことがわかった。また、歩行障害を持つ被験者のアトラクタはその写像が他の被験者と比較して視覚的に著しい歪みがあることも確認できたことから、本手法は整形外科的な検査の定量的な指標としても用いることができると考えられる。

5.1 今後の課題

足踏み運動時の生体ゆらぎと加齢の関係性については、今後、更に被験者の母数を増やすことで高い相関があることを明らかにする。

またアトラクタ形状から足踏み運動時の運動モーメントに起因していると考えられる差異が見られたが、現状、その発生要因を分析するまでには至っていない。そのため、今後モーションキャプチャ等により足踏み運動中の全身の骨格動作や筋力データ等を測定し、今回の結果と比較検証を行う必要がある。

6. 結論

本報告では、民生用ハードウェアを用いて測定した時系列の重心動揺データを用いて時系列カオス解析手法によりアトラクタを再構成し、この形状からリアプノフ指数とスケーリング指数の推定を行い、生体ゆらぎの不安定性と運動モーメントの安定性を運動特徴量として定量的に抽出する手法を提案した。ターケンスの埋め込み定理の埋込次元数 4、埋込遅延時間 8(s)、リアプノフ指数推定時の超球サイズ 0.08、近傍点数 20、発展時間点数 30 として重心移動ベクトルの X 軸成分を解析した結果、運動特徴量の抽出に有効なアトラクタが再構成された。また、このアトラクタから推定されたリアプノフ指数とスケーリング指数が加齢に伴い変化する傾向を確認し、提案手法の有効性を示した。将来的に本手法に基づき認知症などを判定する“生体ゆらぎ解析器”へと展開させるため、更なる研究を進める。

謝辞 本研究は文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム（都市エリア型）岐阜県南部エリア「モノづくり技術と IT を活用した高度医療機器の開発」の可能性試験事業として、財団法人岐阜県研究開発財団から支援を受けたものである。ここに感謝の意を表する。また、今回実験に協力いただいた被験者の皆様や株式会社 CCI の皆様に深謝する。

参考文献

- 1) 北畠義典: 高齢者の日常生活動作能力の計測—生活体力測定法と身体活動量把握時の課題—, 理学療法 26(5), pp.656-666(2009).
- 2) 木村哲也: 立位バランス制御機構に対する自律神経系の関与—加齢に伴う自律神経活動低下の影響—, 第 26 回健康医科学研究助成論文集平成 21 年度, pp.41~48(2011.3).
- 3) 猪飼哲夫, 百瀬由佳, 村瀬仁: 重心動揺計を用いた動的バランス機能評価: 足踏み検査, 運動療法と物理療法 19(4), pp. 291-296(2008).
- 4) 鈴木良次ほか: 生体信号—計測と解析の実際, コロナ社(1989).
- 5) 劉僖根, 鈴木秀明: カオス性からみた心拍変動の加齢変化, 豊橋創造大学紀要, pp. 161-170(1997).
- 6) 横山慶一ほか: 331. 高齢者の歩調ゆらぎと筋力・バランス能力・柔軟性の連関, 加齢・性差, 第 61 回日本体力医学会大会(2006).
- 7) 奥谷知克, 岩崎弘利, 伊藤安海, 久保田怜: ペダル操作による高齢者ドライバの運転特徴量の計測, 自動車技術会 2011 秋季大会(2011).
- 8) 池口徹, 山田泰司, 小室元政: カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書(2000).
- 9) Floris Takens, “Detecting strange attractor in turbulence”, In D.A.Rand and B.S Young, editors, Dynamical Systems of Turbulence, Vol.898 of Lecture Notes in Mathematics, Springer-Verlag, pp.366-381(1981).
- 10) M.Sano, Y.Sawada, “Measurement of the Lyapunov Spectrum from a Chaotic Time Series”, The American Physical Society. Physical review letters 2 September 1985, Vol.55, No.10, pp.1082-1085(1985).
- 11) Peng C-K, Havlin S, Stanley HE, Goldberger AL. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. Chaos 1995-5, pp. 82-87(1995).
- 12) 横山慶一, 木村みさか, 小田伸午: 歩行安定性指標としての歩調ゆらぎの有効性, 加齢・性差 一般口演, 第 63 回日本体力医学会大会, pp. 808(2008).