345 歩行動作のカオス解析と環境による影響に関する実験的・理論的研究

Experimental and theoretical study on Chaos analysis of human gait and influence of environment on human gait

正 河村 庄造(豊橋技科大) ○学 藤田 孝志(豊橋技科大)
 学 松田 浩孝(豊橋技科大) 正 感本 広文(豊橋技科大)
 正 Hossain Md Zahid(豊橋技科大)

Shozo KAWAMURA, Toyohashi University of Technology, Tempaku, Toyohashi, 441-8580, JAPAN
 Koji FUJITA, Hirotaka Matsuda, Hirofumi MINAMOTO, Hossain Md Zahid,
 Toyohashi University of Technology, Tempaku, Toyohashi, 441-8580, JAPAN

It is known that the ecological signal and the kinematical signal for a healthy person have chaos property while those for a disease person have little chaos property. And there is a central pattern generator in human that controls the kinematical motion and it has a synchronous property to environments. In this study, the influence of sound around a person is investigated on the chaos behavior in the case of gait. As a result, the chaos behavior decreases under the regular sound environment while it increases under the chaos sound environment.

Key Words: Human dynamics, Chaos, Lyapunov index, Human gait, Diagnosis

A1. 緒言

脳波、心拍、脈波などの生理的データは、健康な場合にカオス性が高く、疾患を有すると低くなることが知られている。また身体運動に伴うデータ、例えば歩行時の膝関節屈曲角度も同様の傾向が示されている。一方、身体運動は体内に存在する中枢リズム生成回路（Central Pattern Generator：以下 CPG）によって生成されるリズムを元に行われると言われており、CPG には引き込みという性質がある。運動環境を適切に設定すれば、CPG の引き込み現象を利用して歩行のカオス性を高められる可能性がある。

そこで本研究では、歩行運動におけるカオス性と健康性の関係、および CPG による環境への引き込み現象に着目し、健康者の歩行に対して音環境が及ぼす影響をカオスの立場から検証することを目的としている。この検証により、疾患者の歩行リハビリテーションの際に、健康性を高める歩行を行うことにより、早期回復への可能性も考えられる。

A2. 歩行実験

健康者のトレッドミル歩行において、音環境の有無が歩行動作へ及ぼす影響を調べるため、ゴニオメータを用いて膝関節屈曲角度を測定した。測定データのカオス解析を行い、環境が歩行動作のカオス性へ及ぼす影響を検証した。このとき音環境にはメトロノームによる規則的周期の断続音と、カオス性の周期（ゆらぎ）を持つ断続音を作成した。カオス性はリアプノフ指数を用いて評価した。

その結果、Fig.A1 に一例を示すように、規則的周期の断続音を与えた場合は、音が無い場合の歩行動作と比較してカオ

Fig.A1 Lyapunov index in each walking condition in walking experiment (Testee 2)

ス性が低下した。一方、カオス性の周期を持つ断続音を与えた場合はカオス性が高くなることが確認できた。

A3. 理論的検証

神経モデルを用いた引き込み現象の理論的検証を行った。モデルは神経モデルの出力により動作する二重振り子のモデルを使用し、規則的周期の入力として正弦波を入力した場合と、周期にカオス性のゆらぎを持たせた正弦波を入力した場合について検証した。

検証の結果、Table A1 にまとめて示すように、カオス性の音環境に相当する入力をした場合、振り子の挙動にカオス性が確認できた。しかし入力をしない場合および規則的な入力をした場合は、本モデルでは振り子の挙動が規則的になった。今後さらなる検討が必要である。

A4. 結言

本研究では、歩行時の音環境による引き込み現象について、カオス解析を用いて検証を行い、以下の結果を得た。

- (1) 各被験者には歩行に適した速度が存在し、その速度は個人により異なる。
- (2) 規則的な音環境における歩行は、音がない場合よりもカオス性が低下する。
- (3) カオス的な音環境における歩行は、カオス性が向上する。すなわち、ヒトが本来備えている非線形特性を、適切な環境を整えることによって引き出すことができることを示している。
- (4) 神経振動子のモデルでは、カオス性の音環境に相当する入力をした場合、カオス挙動が確認できた。

Table A1 Lyapunov index in each walking condition

	Walking Without sound	Walking with Sound synchronized by walking cycle	Walking with chaos sound of Lyapunov index as follows:		
			1.23	3.36	5.65
Sub. 1	1.47	1.50	1.45	1.61	1.46
Sub. 2	1.77	1.45	1.85	1.77	1.64
Sub. 3	1.97	1.77	1.99	2.02	1.73
Sub. 4	1.55	1.31	1.56	1.55	1.25
Sub. 5	1.64	1.47	1.58	1.71	1.67

1. 緒言

本研究で扱うカオスは生体カオスといい、脳波のカオス解析が活発に研究されている。そして生体のさまざまなサブシステムは脳の制御を受けながら、もしくは脳と相互作用しながらその機能を果たしている、それ以外の様々な生体システムにおいてもカオス挙動が観察されている。例えば、生体信号のカオス解析は脳波、心拍⁽¹⁾⁽³⁾、脈波⁽⁴⁾などに対して行なわれており、カオスの挙動が観察されている。これらの研究では、カオスは必ずしも病的なものではなくむしろ健康な状態と密接に関連している可能性も示されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

さて以上では生体に生じる信号として脳波、心拍、脈波のような生理的なデータについて取り上げたが、次に身体運動を取り上げる。身体運動に伴う信号もカオス性を有する可能性があり、歩行時の身体データ、特に膝関節屈曲角度に着目してカオス解析が行なわれている。その結果、健康者の方が患者よりもカオス性が高いことが示されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

また身体運動は脳神経系や筋骨格系により生成される運動であり、その脳神経系の制御機構は脊髄にある中枢リズム生成回路(Central Pattern Generator: 以下CPG)と呼ばれる神経回路網を中心として、脳幹や小脳、大脳皮質運動野により成り立っている⁽⁹⁾。CPGとは生体の周期運動のリズムを生成する神経回路網のことであるが、もう一つの性質として外部からの入力に対してCPG自身が同調する引き込みという性質がある。引き込み現象により歩道橋が大きく横揺れを起こしたという事例もある⁽¹⁰⁾。

そこで本研究では、歩行時の音環境による引き込み現象について、カオス解析を用いて検証する。そのためトレッドミルを用い、健康者の歩行に周期的な音を与え、その際の膝関節屈曲角度を測定し、カオス解析により影響の度合いを調査する。周期的な音にはメトロノームによる一定周期の音と、カオス性の周期(ゆらぎ)を持つ音の2種類の音を用い、それぞれの音環境においてカオス解析を行う。なおカオス性はリアプノフ指数を用いて評価する。

また、神経振動子の引き込み現象についてシミュレーションを行うために、神経振動子の内部状態に起因して動作する二重振り子モデルを作成し、引き込み現象について基礎的な検証を行う。

2. カオス解析

2.1 カオス カオスとはある系が決定論的法則に従うにもかかわらず、その軌道が初期値に敏感に依存し、結果として解の長期予測が不可能な現象をいい⁽¹¹⁾、決定論的なシステムが作り出す非周期的現象である。カオスの程度を評価する指標としてリアプノフ指数がある。

2.2 リアプノフ指数 リアプノフ指数とは、わずかに離れた2点間の距離の伸縮を定量化する量であり、具体的には相空間内で十分接近した2点から出発した2つの軌道が、先に行くにしたがって離れていく度合いを示す量である。すなわち誤差の指数的大増大の速さのことであり、カオスの特徴付ける重要な量である。そしてそれが正で大きな値である場合に、カオス性は高いことになる。一方その指数が0に近い場合は、現象が周期的かあるいはランダムであることを意味する。

カオス性を評価する軌道の方程式が分かっている場合、 n 変数の連立1次微分方程式から作られる n 次元軌道には、 n 個の独立な運動方向があるので、それに応じて n 個のリアプノフ指数が定義される。

2.3 測定データからのリアプノフ指数導出手法 本研究で扱う歩行動作から抽出するデータは1変数の時系列データであり、支配方程式も不明である。そこで前節のような

解析を行うには、1変数の時系列から多次元空間(以下: アトラクタ)の軌道を再構成する必要がある。

1変数の時系列からアトラクタを再構成してカオス解析を行う方法として、埋め込みの方法がある。時系列 $u(i\Delta t)$ ($i=1,2,\dots,M$) を $X_i = u(i\Delta t)$ と書く。例えば D 次元のベクトル $\vec{x}$ を作るには、Fig.1 に示すように適当な時間遅れ $\tau = m\Delta t$ (遅延時間) を選び、 $\vec{x}_i = (x_i, x_{i+m}, \dots, x_{i+(D-1)m})$ とすればよい。この方法を埋め込みと呼び、 D を埋め込み次元と呼ぶ。

ここで、埋め込み次元 D の決定方法であるが、あらかじめ相関次元を計算して、アトラクタの次元を求め、それより大きな次元に埋め込むという方法があるが、それには手間がかかる。そこで埋め込み次元を徐々に増やして最大リアプノフ指数の計算を行う。すると、次元が上がってくると、最大リアプノフ指数が正であれば、その値はほぼ一定値に落ち着く。したがって、値が落ち着いた時の次元を、埋め込み次元とする。以上のようにして埋め込まれたアトラクタから、最大リアプノフ指数を計算するには、Fig.2 のように埋め込まれた軌道のある時刻における位置ベクトル $\vec{x}_i$ から、出来るだけ近い軌道を探し、これと元の軌道のとの距離 d が時間と共に指数的に離れていくかを調べる。距離がある程度離れると非線形性が働いて、飽和や折り畳みが起こるので、適当な時間(以下: 発展時間 t) ごとに、元の軌道と距離が近く、かつ離れてしまった軌道と近い向きにある軌道を探しだし、それとの距離の変化を追いかけるという操作を繰り返す。この方法は、Wolf等によって考案され、そのプログラムも公開されている⁽¹²⁾。

3. 中枢リズム生成回路(CPG)

CPG とは動物の脊髄に存在する神経のリズム発生器である神経振動子を数学的にモデル化したものである。神経振動子はFig.3のように身体の各関節に存在しており、それぞれの出力は他の神経振動子と相互に影響し合う。

また神経振動子は入力された信号に対して同調するという引き込みという性質を持つ。この性質を用いれば、知覚情報を神経振動子にフィードバック入力することにより、知覚

Fig.1 Reconstruction of attractor

Fig.2 Method of Wolf

Fig.3 Nerve oscillator in each joint

情報との引き込み現象が発生し、様々な外乱に対して頑健な運動生成が可能である。神経振動子は二変数の微分方程式で記述される神経素子が二個つながってできたものであり、一般的には次の微分方程式で表される。

$$\begin{aligned}\tau_i \dot{u}_i &= -u_i - \alpha f(v_i) + \sum_{j \neq i} \beta_{ij} f(u_j) + u_0 + S \\ \tau'_i \dot{v}_i &= -v_i + f(u_i) \\ f(u) &= \max(0, u)\end{aligned}\quad (1)$$

ここで変数 u と v はそれぞれ内部状態と疲労度を表しており、 τ , τ' は時定数、 α は疲労係数、 β は神経素子間の結合の重み係数、 u_0 は定常入力、 S は外部からの入力を行っている。また添え字はそれぞれ神経素子の番号を表している。定常入力 u_0 によって励起された神経素子は自己抑制、相互抑制によって発振される。神経振動子の性質の一つである引き込み現象は外部入力 S によって引き起こされる。

3. 歩行実験

歩行実験に使用した測定装置を Fig.4 に示す。被験者はトレッドミルの任意に設定した速度にて歩行する。

測定は健康者を対象としており、歩行時の右足膝関節屈曲角度をゴニオメータを用いて計測し、測定した角度データのカオス解析を行う。被験者は5人で行う。その際、①音がない環境における歩行、②一定周期の規則的な音を与えた歩行、③カオス性の周

Fig.4 Measurement equipments

Fig.5 Flexion angle without sound

Fig.6 Flexion angle with sound

期を持つ音を与えた歩行、の3つの条件にてカオス性の比較を行う。歩行条件①ではトレッドミルの設定速度を3~5km/hの範囲内で0.5km/h毎に設定して歩行し、被験者のカオス性が高くなる速度の選定を行う。

図5, 6には一人の被験者(被験者2)に対してトレッドミルの設定速度を4.5km/hに設定した場合の測定データの一部を示す。これらの測定結果をカオス解析し、リアプノフ指数を用いてカオス性の比較を行う。

図7は、被験者2に対して、トレッドミルの設定速度を種々に変えた場合の、屈曲角度データのリアプノフ指数の比較を示す。トレッドミルの設定速度が3km/h以下ではリアプノフ指数は小さくなっていった。4~5km/hの時のリアプノフ指数は同程度の値であり、リアプノフ指数が安定して高いといえる。すなわち被験者2にとって4~5km/hの設定速度で歩行することでカオス性が高くなり、適した歩行速度であると考えられる。そこで被験者2に対しては4.5km/hを最適歩行速度と見なし、音環境の引き込みによる影響の検証を行った。

音環境下の歩行条件②ではメトロノームによる一定周期の規則的な音を与え、歩行条件③ではメトロノームの周期にカオス性のゆらぎを持たせた音を与えた。以上の①, ②, ③の条件におけるカオス解析の結果をFig.8に示す。

これより、歩行条件①よりも歩行条件②の方がカオス性は低いことがわかる。これは、身体中の神経振動子に一定周期の規則的な入力引き込まれ、身体本来持つカオス性のゆらぎが規則的になった結果、カオス性が低くなったと考えられる。また、歩行条件③のカオス性が最も高いことがわかる。これは、身体中の神経振動子にカオス性の周期の入力が引き込まれたことにより、身体が本来持つゆらぎのカオス性が増したためと考えられる。

なお歩行実験では、音色、音量、音質等によるカオス性の影響は確認できなかった。

同様にして、歩行実験を行った他の被験者についての結果をTable 1に示す。先と同様に、リアプノフ指数が安定して高い所をその被験者の適した歩行速度とする。

次に②の条件での一定周期とは各被験者の歩行周期のことで、ゴニオメータで計測した角度データより算出した。結果をTable 2に示す。③の条件でのカオス性のゆらぎは、Duffing方程式から得られるカオス挙動で②で得られた周期にゆらぎを与えて作成した。

Fig.7 Lyapunov index at each speed (Testee 2)

Fig.8 Lyapunov index in each walking condition in walking experiment (Testee 2)

Table 1 Lyapunov index at a certain speed [km/h] for each subject

	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Sub. 1	1.48	1.47	1.36	1.36	1.23		
Sub. 2			1.69	1.66	1.79	1.77	1.77
Sub. 3		1.82	1.97	1.86	1.83	1.76	
Sub. 4			1.59	1.41	1.55	1.41	
Sub. 5			1.55	1.64	1.58		

Table 2 Walking speed [km/h] and walking cycle [sec] for each subject

	Walking speed	Walking cycle
Sub. 1	2.5	1.165
Sub. 2	4.5	0.971
Sub. 3	3	1.281
Sub. 4	4	0.962
Sub. 5	3.5	0.880

歩行条件①, ②, ③における各被験者のリアプノフ指数の結果を Table 3 に示す。

Table 3 Lyapunov index in each walking condition

	Walking without sound	Walking with sound synchronized by walking cycle	Walking with chaos sound of Lyapunov index as follows:		
			1.23	3.36	5.65
Sub. 1	1.47	1.50	1.45	1.61	1.46
Sub. 2	1.77	1.45	1.85	1.77	1.64
Sub. 3	1.97	1.77	1.99	2.02	1.73
Sub. 4	1.55	1.31	1.56	1.55	1.25
Sub. 5	1.64	1.47	1.58	1.71	1.67

以上の結果から、全被験者において音環境の引き込みによる影響を確認することができた。音の周期は人によって違いがあるが、カオス性の周期の音環境の方が歩行のカオス性が増す傾向がある。

4. 引き込み現象の理論的検証

神経振動子の引き込み現象を検証するため、神経振動子の内部状態に起因して動作する二重振り子のモデルを作成した。モデルは二対の神経振動子を二組作成し、それぞれの神経振動子の内部状態を各リンクにトルクとして与えることで動作している。ここで二組の神経振動子はそれぞれが干渉しており適切な動作を生成している。また、振り子が歩行中の脚の動作を模擬するように各リンクに粘弾性を考慮しており、リンクの連結部分の屈曲角度を膝関節屈曲角度に対応させて検証を行う。

Fig.9 Output wave form of nerve oscillator

理論的検証を行うため、式(1)のうち一つの神経振動子を取り出した。

$$\begin{aligned}
 \tau_1 \dot{u}_1 &= -u_1 - \alpha f(v_1) + \beta f(u_2) + u_0 + S \\
 \tau_1' \dot{v}_1 &= -v_1 + f(u_1) \\
 \tau_2 \dot{u}_2 &= -u_2 - \alpha f(v_2) + \beta f(u_1) + u_0 - S \\
 \tau_2' \dot{v}_2 &= -v_2 + f(u_2) \\
 f(u) &= \max(0, u)
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、それぞれのパラメータは一般的な値として、 $\tau_1 = \tau_2 = 0.031$, $\tau_1' = \tau_2' = 0.377$, $\alpha = 2.5$, $\beta = -2.0$, $u_0 = 6.0$ を用いた。Fig.9 は外部からの入力が無い状態の神経振動子の出力 u_1 の出力波形を示している。これよりモデルの神経振動子の固有周期は 1.4Hz とわかるので、神経振動子に inputs する波形の周期を 1.4Hz 近傍に設定することにした。

外部入力 S として、一定周期の音とカオス性の周期の音に相当する入力波形の作成を行った。一定周期の音に相当する入力は sin 波形の正の部分を用いた。カオス性の周期の音に相当する入力は、sin 波形の周期にカオス性のゆらぎを持たせた波形の正の部分を用いた。

その結果、一定周期の外部入力を受けた神経振動子の出力波形の振幅や周期は一定であった。それは神経振動子が入力された一定周期の外部入力に引き込まれたために規則的な波形になったためと考えられる。

一方、カオス性の周期の外部入力を受けた神経振動子の出力波形の振幅や周期にはゆらぎが見られた。その結果を Fig.10 に示す。(a)から出力の振幅のゆらぎがわかる。その部分の拡大図が(b)である。(b)では入力波形の周期のゆらぎがわかる。入力波形の周期が長い部分では出力波形の周期も長くなり、出力波形の振幅が小さくなっていることがわかる。逆に入力波形の周期が短い部分では、出力波形の周期も短くなっており、出力波形の振幅は増加している。

神経振動子の内部状態に起因し動作する二重振り子モデルによるシミュレーションにおいて、入力を与えない場合の挙動を行った結果、リンクの屈曲角は規則的な挙動が見られた。これは、本検証に用いたモデルが、実際の歩行時に作用する地面反力や重心移動の概念を考慮しておらず、入力が無い場合の動作においては神経振動子が定常入力に起因した

Fig.10 Output wave form of nerve oscillator under chaos input

結果, 規則的な挙動となったと考えられる。

人の歩行では地面反力や重心移動, 路面状態など複雑な環境が CPG に入力される事でリズムを作成し動作を行うとされており, 音や揺れによる環境が与えられない通常の歩行においても, 身体の運動はカオス性の挙動となると考えられる。

規則的周期入力が与えられた場合, 振り子の屈曲角度も規則的な挙動となった。これは, 規則的な周期の入力に引き込みが起こり, 振り子の挙動も規則的になったためと考えられる。

カオス性の周期を与えた場合は, 二重振り子の挙動にカオス性の挙動が確認できた。これは, 神経モデルがカオス性の周期の入力を引き込んだため振り子の挙動にもカオス性が現れたと考えられる。

以上の結果を以下の Table 4 にまとめる。

Table 4 Lyapunov index in each condition in theoretical verification

	Without input	With Regular input	With chaos input		
			Lyapunov index of input		
			1.23	3.36	5.65
Lyapunov index	0	0	1.59	1.76	1.55

5. 結言

本研究では, 歩行時の音環境による引き込み現象について, カオス解析を用いて検証した結果, 以下のことを得た。

- (1) 各被験者には歩行に適した速度が存在し, その速度は個人により異なる。適した速度の歩行では被験者の歩行動作のカオス性は高くなる。
- (2) 規則的な音環境における歩行は, 音がない場合よりもカオス性が低下する。すなわち健康者の正常な歩行が規則的な音に引き込まれ, 正常な状態から離れたことを示している。
- (3) カオス的な音環境における歩行は, カオス性が向上する。すなわち, ヒトが本来備えている非線形特性を, 適切な環境を整えることによって引き出すことができることを示している。
- (4) 神経振動子のモデルでは, カオス性の音環境に相当する入力をした場合, カオス挙動が確認できた。

文 献

- (1) A.L.Goldberger, D.R.Rigney and B.J.West (西江訳), 日経サイエンス, 20・4(1990), 56.
- (2) 西江, 応用カオス(合原編), サイエンス社, 327(1994).
- (3) 佐光, 心臓血管系のカオス, 数理科学, No.381(1995), 44-47.
- (4) I.Tsuda, T.Tahara & H.Iwanaga, Int. J. Bifurcation and Chaos, 2・2(1994), 313.
- (5) Goodman,L., Oscillatory behavior of ventilation in resting man, IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-11, (1964), 82-93.
- (6) Goodman,L., D.M.Alexander and D.G.Fleming, Oscillatory behavior of respiratory gas exchange in resting man, IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-13, (1966), 57-64.
- (7) 河村他 5 名, 歩行中の膝屈曲角度のカオス解析による疾患診断に関する研究, 日本機械学会 第 15 回バイオエンジニアリング講演会 講演論文集(No.02-35), (2003), 341-342.
- (8) S.Kawamura, M.Kato, T.Iwatsubo, M.Kurosaka, S.Yoshiya and N.Tsumura, Disease Diagnosis by Chaos Analysis of Knee Flexion Angle during the Gait, Sports Dynamics: Discovery and Application, RMIT University, pp.184-189, (2003.9).
- (9) 多賀, 脳・身体・環境の相互作用による歩行の生成・発達・認知, 領域専門 S12, 日本バイオメカニズム学会, (1999), 4.
- (10) 松久・雪本・朴, 歩道橋の横揺れによる歩行リズムの同期現象, 日本機械学会 D&D2003 講演論文集 (No.03-7), on CD-ROM.
- (11) 佐野雅巳, 時系列データからのカオスの診断法をめぐって, バイオメカニズム学会誌, 19・2, (1995), 90-96.
- (12) Wolf, et.al., DETERMINING LYAPUNOV EXPONENTS FROM A TIME SERIES, Physica 16D(1985), 285-317.