水平両眼固視微動のドリフト成分のフラクタル次元解析

正会員 吉 松 浩[†], 正会員 山 田 光 穂^{††}

Fractal Dimension Analysis of Horizontal Binocular Miniature Eye Movement Drift Components

Hiroshi Yoshimatsu[†] and Mitsuho Yamada^{††}

Abstract Miniature eye movement is characterized by its complex waveform, small amplitude and unconsciousness. Involuntary movement like this may be affected by various psychological and physical states. From a view point of a fractal dimension analysis, the characteristics of miniature eye movements were investigated for estimating our sensitivity of feeling. The correlation dimension was used as a fractal dimension for quantizing complexity of miniature eye movements drift components. Validity of sufficient total calculation data (i.e. 18,000 points for 12 embedding dimensions using a bandpass filter) were confirmed. And also differences between experimental data and noise of measurement system were simulated using pseudo white noise. And 1/f power spectrum of experimental data was confirmed using Fast Fourier Transform. This suggested that miniature eye movement may be a biological chaos. The applications of this analysis may be not only sensitivity of feeling estimation but also a medical application as a diagnosis of dementia.

1. ま え が き

人工知能に代表される理性を支援するシステムから感性を支援するシステムへとパラダイムシフトが進む中で、複雑な生体情報を如何に検出し、フィードバックを行うかが、仮想現実などの新しいインタフェースで重要となり、生体情報に意味付けやモデルを与え、それを基礎にして、ひとの感覚や感性をフィードバッ

クできる柔軟なインタフェースが求められている。

一方、カオスは系の自由度が少数にもかかわらず、その複雑な振る舞いと予測不可能性で知られ、一般にその自由度に近い非整数値がフラクタル次元として与えられる。このカオスを用いた生体系の研究が血流や心拍などで精力的になされた^{1)~6)}。

ひとの知覚の中で最も情報量の多い視覚に関するカオスについては、ロジスティックモデルを用いた微

キーワード：固視微動、ドリフト、フラクタル次元、両眼、眼球運動。

1991年7月23日、1991年テレビジョン学会全国大会で発表

1994年12月22日受付、1995年3月24日再受付

[†] ソニー株式会社 中央研究所 (〒141 東京都品川区北品川 6-7-35, TEL 03-5448-2945)

^{††} NHK 放送技術研究所 (〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11, TEL 03-5494-2278)

[†] Sony Research Center (6-7-35, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan)

^{††} NHK Science and Technical Research Laboratories (1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157, Japan)

振⁷⁾のカオスモデルおよび、精神分裂病患者の追従眼球運動の非線形性⁹⁾に注目した眼球運動のカオスモデルが提案され、視覚運動性眼振のフラクタル次元が解析された⁹⁾。また、眼球運動は視覚情報処理と密接な関係にあり、初期視覚から認知レベルに至る各々の階層で、眼球運動の研究が行われている¹⁰⁾¹¹⁾。特に初期視覚では、不規則な不随意眼球運動として固視微動が知られている¹²⁾。固視微動は、一点を見つめる時に無意識に生じ、振幅が小さく、不規則な不随意眼球運動であり、その運動形態から半定量的に以下の3種類の運動に分類される¹⁰⁾。

- (1) 振幅は小さいが随意運動と同様な波形で、振幅が20分程度で0.03~5秒の不規則な周期でステップまたはパルス状に発生するマイクロサッカード。
- (2) マイクロサッカードとマイクロサッカードとの間に生じ、振幅が5分程度以下で連続的かつ微分可能な、ゆっくりと動く成分として知られるドリフト。
- (3) ドリフトの際に生じて、ドリフトと比較し、振幅がさらに1桁小さく、周波数が高く約20 Hz以上で、50から80 Hzにピークをもつトレマーである。

Findlay¹³⁾は、固視微動のトレマーのパワースペクトルが、 $1/f$ 様になっていることを実験的に示した。これは固視微動のトレマーがカオス的であることを示唆する。また、Fender¹⁴⁾はその不規則性にもかかわらず、両眼間固視微動のドリフト成分の相対運動に不完全ながら相関があることを示した。医用応用として固視微動のマイクロサッカードを用いたディスプレイ端末作業者の疲労の統計的評価がなされた¹⁵⁾。これらの固視微動のトレマーやドリフトの特性は、ランダムな波形にもかかわらず様々な特徴を示しており、カオス的な制御系が固視微動に内在する可能性が高いことを示唆する。よって、フラクタル次元解析を用いて固視微動の制御系の有効自由度を定量的に推定し、随意運動における制御系との比較検討を行うことは、固視微動と随意運動制御系との関係を明らかにする試みとして重要であり、他の方法では容易には得られない。

このような試みの一步として、固視微動のフラクタル次元解析は、片眼について6本の外眼筋にかかわる眼球制御系の物理モデルの有効自由度をフラクタル次元として実験的に示唆し、固視微動にかかわる眼球制御系および心理的・身体的な定量的評価法として応用可能性がある。この立場から、フラクタル次元を用いた

固視微動のドリフト成分の解析が報告¹⁶⁾され、サンプリング周波数が30 Hzと低く、ドリフト成分の周波数を十分にカバーしていない等、解析結果に検討の余地を残したが、有限なフラクタル次元が得られる可能性を示唆する結果を得た。

本研究では、従来例¹⁶⁾に対し、測定法を改良し解析方法を検討した結果を報告する。

健常者の両眼固視微動のドリフト成分の測定には強膜反射法を用いた。相関次元を用いたフラクタル次元解析による固視微動のドリフト成分の定量的評価が可能であることを、バンドパスフィルタを用いたデータの前処理の効果、およびデータ点数依存性から示した。比較として、擬似ホワイトノイズのフラクタル次元解析、およびパワースペクトルを用いた解析について示した。さらに、不随意運動の定量化から期待される感性・感覚の計測への応用について議論した。

2. 測定方法

眼球運動の測定原理として、強膜の白色部と虹彩の着色部との反射率の違いを利用した強膜反射法を用いた片眼測定装置が、山田ら¹⁷⁾により開発され、本研究では両眼測定用に改良された両眼眼球運動測定システム(竹井機器工業製)¹⁸⁾を用いた。被験者(健常者2名)は、固視実験に習熟しており、測定条件をできる限り一定に保つために1日1回特定の時刻に行い、各被験者につき延べ100回程度の測定を行ったが、解析手法の是非を判断することが主な目的の本報告では、その中から典型的な例を示すにとどめる。

測定条件は、あご台で頭部を固定した被験者にゴーグル型の両眼眼球運動測定装置を装着し、1 m前方の灰色の指標提示板上の直径5 mmの赤色ダイオードを2分30秒間、固視させる。なお、実験を行った部屋は指標提示板が見える程度に明るい部屋で、赤色ダイオードは、眩しくなく視認性が損なわれない程度の輝度に設定した。データのサンプリング周波数は200 Hz、測定精度は水平・垂直方向について各々 $\pm 10^\circ$ の範囲で校正し、12ビットで量子化した(1ディジット:17.6秒)。両眼の水平方向、垂直方向各々について30000点ずつの時系列データが得られた。

3. データの前処理

図1に、前処理前の眼球運動測定例として、定常的に指標を2分30秒間、被験者に固視させた場合を左眼水平方向について示す。測定中にまばたきが12回生じており、測定値では 10° を越えた値として表示されている。他にサッカードや頭部運動も含めて、 $\pm 5^\circ$

図 1 左眼水平方向の眼球運動波形
Eye movement of left horizontal direction.

図 2 F.I.R.バンドパスフィルタのパワースペクトラム
Power spectrum of F.I.R. bandpass-filter.

表 1 前処理の流れ
Flowchart of pre-processing.

前処理の流れ	
項 目	前処理の内容
瞬き, サッカードの除去	測定データの標準偏差で瞬き, サッカードの値を置き換える.
頭部運動, トレマーの除去	FIR 線形バンドパスフィルタ (2~20 Hz)
左右固視微動のドリフト成分の水平方向の差成分	以上の前処理を施したデータの差をとる

図 3 左眼水平方向のドリフト成分波形
Left horizontal drift component.

p-p 程度の振幅成分が含まれている. この測定データから固視微動のドリフト成分を取り出すために, 表 1 に示す 2 種類の前処理を行う. 以下, 細説する.

3.1 まばたきとサッカードの除去

測定波形中の, まばたきや, サッカードに相当するインパルス的な幅の広いスペクトルを含む部分を, 測定データ全体の標準偏差の値に置き換える. この置き換えには以下の 2 つの理由がある. (1) 4.2 節で述べる擬位相空間中での相関関数の計算において, 与えられたデータの相関距離の最大値で正規化する必要があり, 最大値として, まばたき成分をとらないようにするため, および (2) 相関関数の計算の際に擬位相空間中で, 波形の位相成分を保持するためである.

3.2 頭部運動とトレマー成分の除去

測定波形中の数 Hz 以下の頭部運動や, 固視微動のトレマー成分を取り除くために, 図 2 に示す位相遅れのない線形フィルタとして知られている FIR フィルタ (帯域: 2~20 Hz) と等価な適応平滑法¹⁹⁾を用いた. これらの前処理により, 測定データから抽出されたドリフト成分を図 3 に示す. しかし, 実際にはバイ

トボードを用いないことにより生じる頭部運動からの寄与として, 2 Hz 以下の低周波成分と, トレマーの非常に低い周波数成分として, 10~20 Hz の周波数がわずかに混入している可能性がある.

3.3 水平方向の両眼間の相対運動の抽出

本報告では, 水平方向の眼球運動成分に着目した. これは垂直方向と水平方向の眼球運動に寄与する外眼筋はお互いに異なり, 力学系のモデルとして独立と推定できるため, まず, 左右眼の水平方向の眼球運動の差分として得られる輻輳など, 奥行き知覚などの視覚情報処理により関係の深い水平方向に着目したためである. さらに測定・解析手法として水平方向の眼球運動が有利な点は以下の 2 点である.

(1) 微小な眼球運動を測定するためにはノイズの寄与はさけた方がよいが, 一般に強膜反射法の場合, 水平方向の眼球運動の検出は虹彩の左右端から別々に反射される 2 本の近赤外光の差動増幅から得られるのに対し, 垂直方向の検出は加算で行われるため, 微小な

図 4 両眼ドリフト成分波形

Drift component of binocular miniature eye movements.

眼球運動の検出に対しては、同相ノイズを相殺する効果を期待できる水平方向の差動増幅を用いた方が有利である。また、(2)後述するようにフラクタル次元の解析に必要なデータ点数はフラクタル次元の大きな値ほど多くなるが、垂直方向の眼球運動に寄与する外眼筋の本数4本に比較し、水平方向の外眼筋は2本に限られ、力学系としてより少ない自由度と推定され、より少ないデータ点数で解析の可否の検討が期待されるためである。

図4に両眼間の眼球運動の差における水平方向の相對運動について、ドリフト成分を示す。また、両眼水平方向ドリフト成分のフラクタル次元解析において眼球運動測定時の絶対座標系は不要なので、以下の解析は両眼間の相對運動に限定する。

4. フラクタル次元解析

フラクタル次元は、考えている系の軌跡やデータの幾何学的分布を定量化するものである。例えばデータの分布が線状に並べば、そのフラクタル次元はほぼ1次元になり、平面的に並べば2次元となる。もし、データの分布が、延ばしては畳み込まれたパイ生地のように折り重なるような曲面上に乗っていれば2次元以上3次元未満となり、空間的に一様に分布していれば、そのフラクタル次元は3次元となる。また、フラクタル次元は、その系の有効的な自由度にほぼ等しいことが知られており⁴⁾、完全なノイズの場合はそのフラクタル次元は無限大となる。すなわち、たとえデータが一見ランダムに見えても、そのデータのフラクタル次元が無限大でなく有限であれば、そのデータはノイズではない可能性が高い。フラクタル次元から、系を記述する際に必要な最小限の内部自由度を推定することができる。本研究ではフラクタル次元として、Grassbergerら²⁰⁾によって提案され、Malraison²¹⁾らによって有効性が実験的に示された相関次元 D_2 ²²⁾を用い

た。

4.1 擬似位相空間の生成

バンドパスフィルタ等を通した両眼眼球運動の水平方向、垂直方向各々の成分を離散的な時系列データ $\{x_i : i=1, 30000\}$ として、順に n 個毎に分割し、擬似的な n 次元位相空間中のデータ点のベクトル： $X_i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n-1}\}$ を生成する。このような擬似位相空間について、従来の位相空間とほぼ等価であることがTakens²³⁾によって示された。擬似位相空間への埋め込み次元は1から20次元まで計算した。時系列データがカオスの場合、埋め込まれた軌道はカオス的アトラクタと呼ばれる。アトラクタ表示はカオス的な軌道の巨視的かつ定性的理解に有効である²⁴⁾。

4.2 相関関数 $C(r)$ とフラクタル次元

相関関数の計算の際に桁落ち等を防ぐためにデータの最大値で正規化され、ユークリッドノルムを用いた上記擬似位相空間において、相関距離 r に等しいデータの分布は相関関数 $C(r)$ として次式で計算される。

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (1)$$

ただし、 $i, j : 1, 2, 3, \dots, N$

N : 擬似位相空間中の全データ点数

$H(r)$: ヘビーサイドのステップ関数

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$$

フラクタル次元として相関次元 D_2 は $C(r)$ と r とを両対数プロット後、その傾きとして次式で与えられる。

$$D_2 = \frac{\log C(r)}{\log r} \quad (2)$$

一般的に実験データにおいて、ノイズの影響やデータ点数が有限であることにより相関関数 $C(r)$ の傾きは相関距離 r に依存し、相関次元 D_2 は相関距離 r の関数となる。本研究では、フラクタル次元解析を用いて、固視微動のドリフト成分にかかわる眼球制御系を記述するのに必要な最小限の内部自由度として、実験データに含まれる最大の有効自由度を推定するために、直線とみなせる部分の $C(r)$ の傾き $D_2(r)$ を固視微動のドリフト成分のフラクタル次元とする。これは中程度の相関関数の値における微分値となり、Echmannら²⁵⁾の指摘する統計的に有意な相関距離における値に相当する。

5. ノイズとの比較

固視微動のドリフト成分のフラクタル次元がホワイトノイズと異なることを示すために、擬似ホワイトノ

図5 擬似ホワイトノイズの埋め込み次元依存性
Embedding dimension dependence of pseudo-white noise.

イズをUNIX上のrandコマンドを用いて30000点発生させ、擬似ホワイトノイズの性質およびバンドパスフィルタの擬似ホワイトノイズへの作用を評価した。また、模擬眼を用いて測定系のノイズと異なることを示した。

5.1 フラクタル次元の埋め込み次元依存性

図5に、バンドパスフィルタを通す前後の擬似ホワイトノイズの埋め込み次元依存性を1次元から20次元まで計算した結果、および図4で示した前処理後の30000点の両眼固視微動微動ドリフト成分について、同様の結果を示す。本図における比較からバンドパスフィルタを通した前後の擬似ホワイトノイズは両者とも、ほとんど同様な埋め込み次元依存性を示す。

5.2 測定系のノイズ

測定データの振幅が随意眼球運動に比較し微小なため、測定系のノイズの寄与が考えられる。そのため、測定系のノイズを白紙上に印刷された直径7mmの黒色の模擬眼を用いて、30000点のデータを200Hzのサンプリング周波数で測定した結果、測定系のノイズの標準偏差として0.01°のオーダーを得た。固視微動のドリフト成分の標準偏差0.5°のオーダーの2%程度なので、ノイズにローバーストな相関次元を用いたフラクタル次元の解析では無視できる。

6. 両眼固視微動のドリフト成分

図1および図4で示した両眼固視微動のドリフト成分を拡大し、バンドパスフィルタの効果を従来の解析手段およびカオス的手法を用いた結果を示す。さらに

(a) Eye movement of left horizontal direction

(b) Drift component of left horizontal direction

(c) Binocular drift component of horizontal direction

図6 左眼水平方向眼球運動とそのドリフト成分
Waveform of left horizontal eye movement and its drift components.

フラクタル次元のデータ点数依存性を示す。

6.1 波形

図6(a)に図1で示したバンドパスフィルタを通す前の左眼水平成分のデータで、まばたき成分のない波形の一部(実験開始後、約1分30秒経過)を約10秒間(データ点にして1875点)にわたり示す。図6(a)で示した部分にバンドパスフィルタを通して得られた左眼水平ドリフト成分の波形を図6(b)に示す。図6(a)に相当する左眼水平成分と右眼水平成分との差としての両眼固視微動のドリフト成分を図6(c)に示す。ただし、図6(a),(b),(c)の各々で縦軸のスケールは異なる。

6.2 パワースペクトル

高速フーリエ変換を用いて、図6(a),(b),(c)の各々の波形のパワースペクトルを図7(a),(b),(c)に示す。各々のパワースペクトルは、 $1/f$ 様のパワースペクトルを示し、図7(b),(c)については、低周

(a) Eye movement of left horizontal direction

(b) Drift component of left horizontal direction

(c) Binocular drift component of horizontal direction

図 7 眼球運動とそのドリフト成分のパワースペクトラム

Power-spectrum of eye movement and it's drift components.

波数成分でバンドパスフィルタの効果が著しいことがわかる。

6.3 擬似位相空間への埋め込み：アトラクタ表示

時間遅れの座標を利用して生成された擬似位相空間中のアトラクタ表示では、実際の位相空間とトポロジカルに等価ではあるが、速度等の絶対値には意味がない。しかし、同一のアトラクタ中での相対的な比較は可能である。図 6(a),(b),(c)の波形の 2 次元擬似位相空間への埋め込みを図 8(a),(b),(c)に示し、以下ではドリフト成分とマイクロサッカドを軌道の

(a) Left horizontal eye movement

(b) Left horizontal drift component

(c) Binocular drift component

図 8 左眼水平方向とそのドリフト成分および両眼ドリフト成分のアトラクタ表示

Attractors of the left horizontal eye movement, it's drift component and it's binocular drift component.

パターンから議論する。

時間遅れの座標を利用して生成された擬似位相空間中のアトラクタ表示では、一般にバンドパスフィルタを通した後の波形データの場合、中心部に集まる点ほど相対的に振幅が小さく、速度も低い。ただし図8(a)において、4.1節で述べた擬似位相空間の生成法そのままでは、頭部運動などの低周波成分を含むことにより、相対的にサンプリング周波数が高すぎ、ほとんど1次元的なアトラクタとなる。1次元的なアトラクタでは、現象の定性的な理解にも不十分なので、サンプリングされたデータを100個毎に用いた。これは時間にして0.5秒間隔で2次元プロットすることに対応する。また、サッカーボールによる相対的に速度の大きな直線的な軌跡によると推定される巨視的な軌跡の移動が見られる。

ドリフト成分のアトラクタ表示の図8(b)と(c)との比較において、(c)の両眼固視微動のドリフト成分は相対的に中心部に集中し、速い運動に相当する大きな軌道が少ない。よって(c)では、高速で同相的なマイクロサッカーボール成分が相殺されていると推定される。すなわち、左右眼水平方向の相対運動の場合、マイクロサッカーボール等の共役運動はほとんど相殺され、ドリフトおよび輻輳成分が抽出されると推定される。

6.4 相関関数 $C(r)$ の相関距離 r 依存性

図9(a), (b)に、バンドパスフィルタを通した前後の両眼固視微動のドリフト成分の相関関数の相関距離依存性を両対数表示で示す。埋め込み次元は上の相関関数から1から20次元までとした。図9(a)において、各埋め込み次元での相関関数が直線的で、その傾きは埋め込み次元に近く、不規則性が高いことを示す。バンドパスフィルタを通した両眼固視微動のドリフト成分の2次元擬似位相空間での分布は、ガウス分布様に中心部から緩やかに裾野を引く分布になるため、図9(b)において、相関関数は相関距離が-3.5よりも大きな領域で上に凸の単調増加関数とみなせる。

6.5 フラクタル次元のデータ点数依存性

フラクタル次元を計算する際に必要なデータ点数について、フラクタル次元の埋め込み次元依存性を用いて示す。Sanoら²⁶⁾によれば、任意の時系列データについて、フラクタル次元として8次元程度の値を得るためには、一般的に 10^{12} 個程度の時系列データを必要とする。図10に、30000点の同一データの時間的な中点として、75秒後のデータ点(150000点目)から前後に12000点、18000点、24000点、の時間幅で切り出し、各総データ点数をパラメータとして計算した

(a) Before bandpass filter

(b) After bandpass filter

図9 フィルタを通す前とフィルタを通した後の両眼固視微動の相関関数の相関距離依存性
Correlation distance dependence of correlation functions of binocular drift component and filtered binocular drift component.

図10 データサンプル数依存性
Sampled number dependence.

図 11 2 人の被験者に対する両眼固視微動ドリフト成分の埋め込み次元依存性
Embedding dimension dependence of fractal dimension of binocular drift components for two subjects.

フラクタル次元の埋め込み次元依存性を示す。12000 点では、10 次元以上の高い埋め込み次元で相関次元がゆるんでいるが、18000 点以上では、12000 点の場合に見られるようなゆるぎは、12 次元まではほとんどない。これらのゆるぎは高次元擬似位相空間中でのデータ点数の不足に起因するものと推定され、ゆるぎが確認できた次元でフラクタル次元の計算を止めた。以上の結果から、健常者の両眼固視微動のドリフト成分において、総データ点数が 30000 点の場合、12～15 次元までの相関次元の計算が可能となる。また、総データ点数が 18000 点の場合でも、12 次元程度までの相関次元の計算は可能である。

6.6 フラクタル次元の埋め込み次元依存性

2 人の被験者の各々異なる日のほぼ同一時刻に測定したデータをもとに、両眼固視微動のドリフト成分のフラクタル次元について、その埋め込み次元依存性を図 11 に示す。同一被験者でも、埋め込み次元依存性に差がある。また、異なる被験者間におけるフラクタル次元の埋め込み次元依存性は、各々の被験者に依存する特徴がある。

7. 固視微動の定常性とフラクタル次元解析の考察

6.4 節で述べた両眼固視微動のドリフト成分のフラクタル次元は、相関次元を用いて定義されているので、前処理後のデータに対し 1 つのフラクタル次元を与えるのみである。これは眼球制御系を定常的な力学系と見なし、その不変量としての有効自由度を推定す

る場合には有効である。しかし、固視微動は定常的な運動とは限らない¹⁶⁾。固視自体が視覚的フィードバックを伴う眼筋の緊張した状態と考えられる²⁷⁾ので、両眼固視微動のドリフト成分を定常的な力学系とする仮定のもとにフラクタル次元解析を行う場合、各被験者によって異なる疲労等に十分な注意を払う必要がある。そのためには、データ点数と測定時間およびサンプリング周波数との兼ね合いが重要な問題となる。フラクタル次元の計算方法の改良により、同一のデータ数に対して、計算時間は更に短くなることが期待されるが、一般的に着目する現象の典型的な周波数に対して、サンプリング周波数をむやみに高くしても、現象の解析には有効ではない。このため、被験者の心理状態変化、注意力変化へ応用を考える場合、心理状態等の変化に要する時間との兼ね合いが検討課題として挙げられる。内観を含む予備的な検討結果として、週末後の測定や被験者が VDT 作業や他の視覚心理実験の後の場合、フラクタル次元にして 1 程度の差が現れることが得られているが、現在、検討中である。

このように、固視微動の眼球制御系の有効自由度が被験者の心理的状态や注意にどの程度依存するか、その手がかりがつかめれば、ドリフトの視覚的修正では位置フィードバックの寄与と速度フィードバックの寄与があると報告されており²⁸⁾、これらの寄与をモデル化することも期待される。

今後、固視微動のドリフト成分の力学系のモデル化および、それを用いたひとの心理状態および情動反応等の検出システム、フィードバックシステム等を構築する際に、その非線形性の評価は重要となる。何故なら、予測可能性に関して非線形システムは線形システムと著しく異なるためである。時系列データの非線形性を評価する統計的手法として、統計的仮説を用いずに、 (n) 番目の時系列データを $(n-1)$ 番までの時系列データの線形結合で近似する Auto-Regressive (AR) モデル等の無仮定線形モデルで再現し、パワースペクトル、平均値、分散、相関等の統計性等の統計性を実験データのそれと比較し、統計性が異なる場合、実験データに非線形性を認める方法が知られ、今後の課題として最も重要である²⁹⁾³⁰⁾。

8. む す び

不随意運動として知られる両眼固視微動のドリフト成分の定量的な評価方法として、フラクタル次元解析を提案した。また、左眼と右眼の水平方向の差分としての両眼固視微動のドリフト成分と擬似ホワイトノイズとの比較をフラクタル次元解析を用いて行い、両眼

固視微動のドリフト成分について、擬似ホワイトノイズとは異なるフラクタル次元を得た。これは両眼固視微動のドリフト成分のフラクタル次元が測定系などのノイズではないことを示唆し、今後、眼球制御系の有効自由度を得る手がかりとなる。

また、ホワイトノイズとは異なる両眼固視微動のドリフト成分のフラクタル次元として4～8次元前後の値を得るためには、18000点程度の眼球運動の測定データで充分であることを、バンドパスフィルタ等を用いて前処理を行った30000点のデータをもとにデータ点数依存性から明らかにした。

固視微動の定量的な解析には、固視微動の不随意性故に、心理状態や疲労の客観的かつ定量的評価の可能性がある。また、視覚機能障害を伴う痴呆症等の疾患の診断応用可能性もある³¹⁾。今後、固視微動の非線形性を検討するために7.1節で述べた統計的検討に加え、本研究で用いた線形のバンドパスフィルタに代わり、さらにS/Nを上げるために、非線形なバンドパスフィルタを用いた固視微動のフラクタル次元解析から、固視微動の非線形性の有無を検討する。今回は、固視微動のドリフトの水平方向成分に注目したが、垂直方向についても今後の興味深い課題である。また、固視微動全体として、3種類の運動を統一的に理解するためには、バンドパスフィルタ等以外にマルチフラクタル等の適用が必要とされる。システムへの応用として、Sakainoら³²⁾は、視線入力をディスプレイへ応用する際の不随意眼球運動等の処理にカルマンフィルタを用いた手法を提案したが、不随意眼球運動である固視微動についても、定量的な評価手法や眼球運動測定装置を用いてビジュアルディスプレイの使用者が無意識に示す様々な手がかりから、使用者の注意の程度や疲労感などを推定し、視線位置から画像のどの部分で注意が高くなるかを評価し、使用者の好みやセンスに合わせたインタラクションを実現する可能性がある。

本研究はATRに在籍中に行った。発表の機会を与えてくださったソニー(株)中研の山本部長に感謝いたします。本研究の機会を与えて下さった淀川英司ATR視聴覚機構研究所社長(現工学院大学教授)に感謝します。研究を進めるに当たり助言ならびにご指導頂いた同視覚研究室の上野圭一室長(現NTT(株))に感謝します。実習生としてご協力頂いた豊橋技術科学大学の人見繁氏と鈴木達也氏に感謝します。魚森謙也研究員(現松下電器産業(株))ならびに本郷仁志研究員(現三洋電機(株))には、日頃から有益な討論等を頂き感謝します。被験者の皆様に感謝します。

〔参考文献〕

- 1) A. L. Goldberger, B. J. West: "Fractals in Physiology and Medicine", The Yale Journal of Biology and Medicine, **60**, pp. 421-435 (1987)
- 2) D. T. Kaplan, M. Talaji: "Dynamics of Heart Rate", Chaos, **1**, pp. 251-256 (1991)
- 3) E. C. Eckstein: "Fractal Brownian Motion, Fractal Dimension, and Particle Motions in Blood Flow", Proc. IEEE/EMBS, **13**, 5, pp. 2240-2241 (1991)
- 4) E. Basar: "Chaotic Dynamics and Resonance Phenomena in Brain Function: Progress, Perspectives, and Thoughts", In E. Basar ed., "Chaos in Brain Function", Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 1-30 (1990)
- 5) W. J. Freeman: "Simulation of Chaotic EEG Patterns with a Dynamic Model of the Olfactory System", Biol. Cybern., **56**, pp. 139-150 (1987)
- 6) G. Mayer-Kress, C. Barczys, W. J. Freeman: "Attractor Reconstruction from Event-Related Multi-Electrode EEG-Data", In A. V. Holden ed., "Proceedings of the International Symposium Mathematical Approaches to Brain Functioning Diagnostics of the International Brain Research Organization", World Scientific (1991)
- 7) N. Akamatsu, B. Hannaford, L. Stark: "An Intrinsic Mechanism for the Oscillatory Contraction of Muscle", Biol. Cybern., **53**, pp. 219-227 (1986)
- 8) B. A. Huberman, S. H. Koslow, A. J. Mandell, M. F. Shlesinger eds. "A Model for Dysfunctions in Smooth Pursuit Eye Movement", Annals of the New York Academy of Sciences, 504, Perspectives in Biological Dynamics and Theoretical Medicine; Conference, Bethesda, Maryland, USA, April 9-11 1986. VIII+313p. The New York Academy of Sciences: New-York, USA.
- 9) M. Shelhamer: "Correlation Dimension of Optokinetic Nystagmus as Evidence of Chaos in the Oculomotor System", IEEE Trans. **BME-39**, pp. 1319-1321 (1992)
- 10) 池田: "視覚の心理物理学", pp. 205-232, 森北出版 (1975)
- 11) A. L. Yarbus: "Eye Movements and Vision", Penum Press (1967)
- 12) R. H. S. Carpenter: "Movements of The Eyes 2nd Edition Revised and Enlarged", pp. 124-138, London: Pion. (1988)
- 13) J. M. Findlay: "Frequency Analysis of Human Involuntary Eye Movement", Kybernetik, **8**, pp. 207-214 (1971)
- 14) D. Fender, B. Julesz, "Extension of Panum's Fusional Area in Binocularly Stabilized Vision", J. Opt. Soc. Am., **57**, pp. 819-830 (1967)
- 15) 齊藤, 青木, 石川: "VDTと固視微動", 日本の眼科, **59**, 8, pp. 863-866 (1988)
- 16) 吉松, 山田: "固視微動ドリフト成分のフラクタル次元", テレビ誌, **45**, 2, pp. 244-246 (Feb. 1991)
- 17) M. Yamada, T. Fukuda, M. Hirota: "Development of an Eye-Movement Analyser Possessing Functions for Wireless Transmission and Auto-Calibration", Medical & Biological Engineering & Computing, **28**, pp. 317-324 (1990)
- 18) 魚森, 山田: "時分割立体画像融合時の片眼運動刺激に対する両眼眼球運動測定", テレビ誌, **46**, pp. 1025-1035 (1992)
- 19) S. Kawata, S. Minami: "Adaptive Smoothing of Spectroscopic Data by a Linear Mean-Square Estimation", Appl. Spectrosc., **38**, pp. 49-58 (1984)
- 20) P. Grassberger, I. Procaccia: "Measuring the Strangeness of Strange Attractors", Physica, **9D**, pp. 189-208 (1983)
- 21) G. Malraison, P. Atten, P. Berge, M. Dubois: "Dimension of Strange Convective Systems", J. Phys. Lett. **44**, pp. 897-

902 (1983)

- 22) H. Takayasu: "Fractal in the Physical Sciences", pp. 141-162, Munchester Univ. Press (1990)
- 23) F. Takens: "Lecture Notes in Mathematics: Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980 Proceedings", pp. 366-381, Springer-Verlag (1980)
- 24) W. J. Freeman: "Analysis of Strange Attractors in EEGs with Kinesthetic Experience and 4-D Computer Graphics", In E. Basar ed., "Chaos in Brain Function", pp. 153-161, Berlin, Germany: Springer-Verlag (1990)
- 25) J. P. Echman, D. Ruelle: "Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors", Rev. Mod. Phys., **57**, 3, pp. 617-656 (1985)
- 26) M. Sano, Y. Sawada: "Measurement of the Lyapunov Spectrum from a Chaotic Time Series", Phys. Rev. Lett., **55**, 10, pp. 1082-1085 (1985)
- 27) 芋阪, 木田, 三輪, 古賀: "眼球運動からみた固視の検討", 名古屋大学環境医学研究所年報, XXXIII, pp. 77-81 (1982)
- 28) J. de Bie, G. van den Brink, "Small Stimulus Movements are Necessary for the Study of Fixational Eye Movements", In A. G. Gale, et al. eds., "Theoretical and Applied Aspects of Eye Movement Research", pp. 63-70, Amsterdam, Holland: Elsevier (1984)
- 29) J. Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian, J. D. Farmer: "Using Surrogate Data to Detect Nonlinearity in Time Series", Physica D, **58**, pp. 77-94 (1992)
- 30) S. J. Schiff, T. Chang: "Differentiation of Linearly Correlated Noise from Chaos in a Biologic System using Surrogate Data", Biol. Cybern., **67**, pp. 387-393 (1992)
- 31) H. Yoshimatsu, M. Yamada, S. Murakami, M. Fujii: "Fractal Dimension Analysis of Binocular Miniature Eye Movement Drift Components of Patients with Alzheimer's Disease", Proc. IEEE/EMBS, **14**, pp. 81-83 (1992)
- 32) H. Sakaino, A. Tomono, F. Kishimoto: "A Kalman Filtering with a Gaze-Holding Algorithm for Intentionally Controlling a Display Object by the Line-of-Gaze", IEICE Trans. Fundamentals, **E76-A**, 3, pp. 409-424 (1993)

よしまつ ひろし
吉松 浩 昭和 57 年, 東北大学大学院理学研究科物理学第 2 専攻前期課程修了。同年, ソニー(株)に入社。平成 2 年より, (株) ATR 視聴覚機構研究所へ出向。眼球運動の研究に従事。平成 5 年, ソニー(株)中研ディスプレイ研究部に復帰。現在, ヒューマンファクタの研究に従事。正会員。

やまだ みつほ
山田 光穂 昭和 53 年, 名古屋大学工学部電子学科卒業。昭和 55 年, 同大学院前期課程修了。同年, NHK に入局。岡山放送局を経て, 昭和 58 年より, 放送技術研究所に勤務。平成元年より, (株) ATR 視聴覚機構研究所に出向。平成 5 年より, NHK 放送技術研究所に復帰。視覚系の情報処理および眼球運動の制御機構の研究に従事。工学博士。正会員。