ウェーブレットを用いた注視時眼球運動の平滑化

正会員 吉 松 浩[†]

Smoothing of Miniature Eye Movement using Wavelet Analysis When Gazing a Fixed Target

Hiroshi Yoshimatsu[†]

Abstract Wavelet analysis of eye movements when subjects gaze at a fixed target is proposed. This enables us to get a low-noise waveform of eye movement from raw data. Time derivatives of the data, i. e., velocity and acceleration, can be easily obtained using this method. The results are compared with the results obtained by a method that smooths the waveform of miniature eye movement using an FIR filter. Three applications are discussed: a representation of eye movement using chaotic attractor, a vector representation of acceleration of eye movement, and a statistical analysis to estimate minute skewness of miniature eye movement acceleration. The decrease of the blink component using wavelet analysis is also discussed. These applications can be used to evaluate the picture quality of new virtual and stereoscopic displays.

1. ま え が き

マルチメディア応用ディスプレイの普及に従い、ディスプレイの多様化が進んでいる。この流れの中で視覚的ヒューマンファクタの位置づけは変化しつつあり、従来の観賞用ディスプレイを前提とした考え方¹⁾²⁾に加え、近年は双方向の通信も含め、立体視および運動視等に関するヒューマンファクタも考慮されつつある³⁾。後者では、臨場感または視覚的没入感を伴う虚像を用いたディスプレイのヒューマンファクタが必要となる。ハイビジョン等の画質評価技術として知られる視線分析⁴⁾では、視線軌跡の評価に加え、注

視点に着目し、その分布や注視点間における眼球速度から呈示画像に視線がどのように依存するかを定量的に評価した。また、視標パターン観察時の眼球運動について、最大エントロピーに基づく解析方法と高次モーメント特徴量を併用した統計的解析方法が提案された⁵⁾。

一般的に分類された眼球運動を、各々の眼球運動に典型的な周波数と振幅とを用いて図1に示す。図中の各眼球運動の振幅と周波数に関する階層性に数学的な厳密さはないが、定性的な階層性があり、眼球運動の振幅-周波数による分類可能性を示唆する。主に視線分析に用いられる眼球運動には、追従眼球運動、輻輳

キーワード：眼球運動、注視、視線分析、ウェーブレット、アトラクタ

1996年6月21日、ヒューマンインフォメーション研究会で発表

1996年6月10日受付、1996年8月29日再受付

[†] ソニー株式会社 中央研究所 (〒240 横浜保土ヶ谷区藤塚町174, TEL 045-353-6848)

[†] Research Center, Sony Corporation (174, Fujitsuka-cho, Hodogaya-ku, Yokohama 240, Japan)

図 1 眼球運動の分類

Classification of type of eye movements.

運動、サッカードがあり、それらは過渡的な波形である。また、注視時眼球運動として知られ、微小で一見不規則な固視微動と呼ばれるドリフト、マイクロサッカード、トレマーは注視点の定義などが必要となり、図 1 から明らかなように、振幅-周波数のプロットに関して互いに分離し、ドリフトについては自己相似性で知られるフラクタルを用いた解析が試みられている⁹⁾。

これらの眼球運動の解析について、時間的定常性を前提とするフーリエ解析とは異なり、多重解像度解析とも呼ばれ、自己相似的な時空間的階層構造のフィルタであるウェーブレット解析⁷⁾⁸⁾は、表 1 に示す応用可能性を有し、定性的な階層性を示す眼球運動の解析について有効性が示唆される。眼球運動の測定法については Collewijn らの提案する測定要件とともに、多くの方式が提案され、測定精度の向上や被験者への負担の軽減等の改良がなされてきた⁹⁾。さらに測定後のデータ処理に関して、瞬目の除去、波形の抽出と平滑化が課題となる。瞬目については、その心理的研究¹⁰⁾に加えて画質評価への応用もなされ、瞬目の生起頻度とその分散に着目し、立体画像と通常の 2 次元画像について解析が行われた¹¹⁾。これらの感性工学的な生理的指標ともなりうる瞬目を眼球運動波形から除去または低減することは、眼球運動測定に関して重要な課題となり、表 1 に示すウェーブレットの応用の中で(4)周期的信号上のパルスのノイズの除去に相当する。また、平滑化については表 1 の(5)ランダムノイズの除去に相当する。随意眼球運動の平滑化については、眼球制御系を滑らかな動きに相当する追従眼球運動制御系と、跳ぶような動きに相当するサッカード制御系の組合せで統一的に説明する試みもなされており¹²⁾¹³⁾、両者の同時測定と波形の抽出は必要であるが、波形の振幅が充分大きく、多くの場合、追従眼球運動と比較

表 1 ウェーブレット解析の応用可能性

Possibility of applications of wavelet analysis for eye movements.

特徴：時空間的階層フィルタであり、データの局所相似性の解析に適する。

- (1) 振幅を閾値とするフィルタ。
- (2) 波形の変極点や微分不連続点の検出。
- (3) サブバンドによる波形検出。
- (4) 周期的信号上のパルスのノイズの除去。
- (5) ランダムノイズの除去。

してサッカードの速度も充分大きいために、現在の多くの測定方法ではほとんど問題はない。一方、固視微動に関しては、微小な振幅と高い周波数のためにトレマーの平滑化に関して課題が残されている。その課題は、(i)微小な振幅と短時間な過渡現象であるマイクロサッカードのより忠実な抽出と、(ii)注視時眼球運動波形を微視的に評価可能な程度に平滑化することである。(i)に関して、従来例⁶⁾は、水平方向のドリフト成分に着目し、平滑化によるトレマーの低減と輻輳成分を抽出することによりマイクロサッカードを低減したが、他方、マイクロサッカードの解析の必然性がテクスチャと眼球運動の統計的な相関について明らかにする際に指摘された¹⁴⁾。その中で境野らは、眼球運動にウェーブレット解析を施し、各解像度毎にテクスチャの影響度について解析した。その結果、テクスチャの構造的な相違性はドリフト成分に発現し、その空間周波数的な類似性はトレマー、マイクロサッカードを含む高周波帯域側の眼球運動に発現することを示唆する結果を得た。この場合、表 1 の(3)サブバンドによる波形検出に相当し、表 1 の(4)または(5)には相当しないが、これはウェーブレット応用としての波形の平滑化においても同様であり、注視時眼球運動にかかわる視線分析の前処理として、ドリフトと同様にマイクロサッカードの評価の必要性を示唆する。従来例⁶⁾ではドリフトのフラクタル次元の計算に主眼を置いたが、本研究では固視微動の平滑化に主眼を置くため、最も微小な振幅で周波数が高くノイズのよう¹⁵⁾なトレマーについてマイクロサッカードとドリフトとからの分離を検討する。ドリフト成分を中断し発生するマイクロサッカードは 20~30 ms 程度のステップ応答様の波形のために広がったスペクトルを示し高周波成分を多く含み、そのステップ応答様波形をより精密に解析するためには、ドリフト成分の抽出を主眼とした 20 Hz 程度までの波形の解析に加えて、トレマー成分に対応する 20 Hz 程度以上の波形も可能な範

囲で測定する必要がある。このため本研究では100 Hz および 200 Hz のサンプリング周波数を採用した。(ii)に関しては、波形を十分に平滑化し、時間に関する2階微分である加速度のノイズ低減を検討する。眼球運動の加速度に着目した例はトレマー⁹⁾および随意眼球運動に関して知られている。振幅の大きな随意眼球運動では、ヒトとサルについて動視標に対する追従眼球運動の利得が、視標の最大加速度で決定され、眼球運動の加速度と網膜上の視標の運動との相関が示された¹⁶⁾。また、視覚的ノイズとしての注視時眼球運動を含む眼球運動の加速度の自己相関関数に着目した例では、適応的カルマンフィルタを用いて提示された視標のテクスチャに依存する眼球運動の解析と予測を行い、眼球運動に起因する揺らいだ網膜情報から視覚情報を最適化するモデルの提案がなされた¹⁷⁾。このような加速度に着目した眼球運動の評価方法において、注視時眼球運動である固視微動の微視的な振舞いを明らかにする場合、相対的に大きな加速度のマイクロサッカードを含めた眼球運動の加速度の精度を上げるために、マイクロサッカードの波形を保ちつつ、平滑化によるトレマーとノイズの低減が必要である。これらの点に関して、(1)従来例⁶⁾の手法を眼球運動の加速度に着目した評価方法に適用する場合と、(2)従来例⁶⁾における問題点と本研究での課題とを比較し、表2にまとめる。従来例⁶⁾では時間微分によるノイズの増大を避け、高次元位相空間を生成する場合に有効な遅延時間に基づく擬似位相空間¹⁸⁾中で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を行った。そのために生ずる表2の従来手法の問題点(1-3)は、系の不変量であるフラクタル次元の計算や同一データ内での相対比較の場合には問題とならない。しかし、複数の固視データ間ではアトラクタの振幅等の比較が困難となる。また、表2の従来手法の問題点(1-2)によるアトラクタ表示の精度の低下について、複数の固視データ間で比較検討する際には表2の従来手法の問題点(1-1)とともに改良が必要である。

本研究では、視線分析を支えるひとつの新要素技術として、注視時眼球運動のウェーブレット解析を用いた波形の平滑化を提案し、移動平均法とも呼ばれ、最も単純なローパスフィルタとして知られる Finite Impulse Response(以下、FIR)フィルタ¹⁹⁾を用いて抽出された水平固視微動のドリフト成分の解析⁶⁾における平滑化方法を用いた場合との比較を、パワースペクトルおよび波形について行い、波形の平滑化に伴うトレマーおよび瞬目の低減および位置、速度と加速度の次元を持つ位相空間中のアトラクタ表示の検討を行っ

表2 加速度に着目した注視時眼球運動の解析における従来手法の問題点と本研究の検討課題
Comparison of problems that are related with acceleration of fixation eye movement between a previous work and this paper.

従来手法の問題点
(1) 注視時眼球運動の速度と加速度を移動平均法(FIR)を用いて求める場合、固視微動の平滑化とノイズ低減が不充分なため以下の問題を生じる。
(1-1) 遅延時間座標に基づく擬似位相空間を用いるために再現軌道の変形を生じる。また、変形を最小限にするためにデータ毎に最適な遅延時間を選択する必要を生じる ¹⁸⁾ 。
(1-2) アトラクタ表示法においてサンプリング周波数が低い。
(1-3) 擬似位相空間を用いたアトラクタ表示法では速度等に代わり遅延時間表示を用いるためにデータ間での速度等の絶対比較ができない。
(2) 瞬目の除去または低減方法として瞬目部分を波形の標準偏差で置換えた。
(2-1) そのため、瞬目部分で波形に不連続を生じる。
本研究の検討課題
(1) 線形ローパスフィルタとして遮断特性の良いフィルタを提案し、このフィルタを用いて波形の平滑化とノイズの少ない速度、加速度を求める。
(1-1) 変位とその時間微分から成る位相空間中のアトラクタ生成の検討。
(1-2) データサンプリング周波数の精度を有する精細なアトラクタ表示の検討。
(1-3) 複数の眼球運動加速度データを用いて視線の微視的評価法の検討。
(2) ウェーブレットを用いた波形の平滑化により、
(2-1) 「波形の平滑化」と「瞬目除去または低減」を同一の波形処理で行い、瞬目部分の波形の自然な補正の検討。
上記表中の番号は本表を引用する本文中の番号に対応する。

た。また、ウェーブレット解析を用いた平滑化波形の時間微分からノイズの少ない注視時眼球運動の加速度を求め、応用として以下の(1)、(2)、(3)に示す微視的表示法を検討する。

- (1) 視線に沿って各点における眼球運動の加速度をベクトル表示し、その視線位置における眼球の速度の変化を図示化することを検討する。これは、同一データまたは異なるデータの視線軌跡において、加速度の大きな場合と小さい場合とを比較し、定性的ではあるが、その視線位置付近における視覚的情報と眼球運動の加速度との相関の検討可能性を示唆する。
- (2) 同様な微視的表示法として、位置-加速度のアトラクタ表示について、注視点近傍でのアトラクタが負の相関を持つことに着目し、複数のデータ間における注視眼球運動の微視的評価を

表 3 ウェーブレットの時空間フィルタとしての特徴
Characteristics of wavelet analysis as a spatio-temporal filter.

- (1) フーリエ変換を周期性は崩しながらも、相似性を保ち局所化する。
- (2) 時空間的に局所的、かつ2の階乗で多重の解像度をもつフィルタ。
- (3) ある解像度のフィルタとその2倍の解像度のフィルタの間には常に階層構造的な関係が成立する。
- (4) 離散ウェーブレットは2の階乗のデータ点またはスプライン補間した任意の時系列データに対して応用可能である。
- (5) 波形の平滑化能力が高い。
- (6) 位相シフトが少ない。
- (7) 周波数分解能は不確定性関係のため良くない。

比較検討する。

- (3) さらに、異なるデータ間の加速度の比較をその3次の統計量であるスキューネスをを用いて解析し、複数の点における斜方固視時の眼球の加速度の微小なオフセットの可能性を検討する。
- 瞬目については、固視微動波形の平滑化の前処理と同時に瞬目の低減、除去を検討する。

2. 眼球運動におけるウェーブレット解析

ウェーブレットの時空間フィルタとしての特徴を表3に示す⁷⁾。また、ウェーブレットの時空間的なフィルタ精度について不確定性関係が知られ、各解像度における時空間的精度は

$$\Delta f \Delta t \approx 1$$

によって制限され、時間領域での分解能 Δt を上げると周波数領域での分解能 Δf が低下する⁷⁾。実際の波形平滑化などではウェーブレット基底関数と対になったスケーリング関数により表される。離散ウェーブレットの最も簡単な Haar(ハール)のウェーブレットについて述べる²⁰⁾。ハールのスケーリング基底関数は第1式で定義され

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

この関数から直交関数系を以下の第2式で定義する。

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^{\frac{j}{2}}x - k) \quad (2)$$

さらにハールのウェーブレットを第3式で定義し

$$\psi(x) = \phi(2x) - \phi(2x-1) \quad (3)$$

同様にその直交関数系を第4式で定義する。

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^{\frac{j}{2}}x - k) \quad (4)$$

第2式と第4式を基底にして、2乗可積分関数としての時系列データの波形を展開する。ハールのウェーブ

図 2 Harr のウェーブレットによる解析関数の近似
Approximation of analytic function using Harr Wavelet.

レットを用いた各解像度におけるスケーリング関数を図2に重ね書きする。レベル5の解像度では、そのスケーリング関数によって、比較的正確なトレースがなされている。高いレベルの解像度のスケーリング関数では、それよりも低いレベルの解像度の情報がすべて含まれており、レベル2の情報は低周波数の波形のうねりに相当し、高いレベルのウェーブレット成分には低周波成分は含まれていない。これを利用すると、ウェーブレット変換後の成分において、与えられた閾値以下の振幅をカットし、逆ウェーブレット変換を行うことにより小さな振幅のノイズ成分を除去することが容易となる。なお本研究では、完全正規直交ウェーブレットとして知られる Daubechies (以下ダウベシズ) のウェーブレット⁷⁾を用いた。

3. 解析結果：波形の平滑化

この章では、ウェーブレット解析による波形の平滑化を FIR フィルタの場合と比較し、従来の視線分析とは異なる眼球運動の微視的評価法を検討する。実験は真正面固視時の不随意眼球運動について表4に示す実験条件で行った。眼球運動のウェーブレット解析は

表 4 実験条件：真正面の視標の固視
Experimental conditions: primary position.

眼球運動の測定方式	強膜反射法による左右両眼の眼球運動について水平方向と垂直方向とを独立に測定
サンプリング周波数	200 Hz
測定時間	2分30秒間
校正 (A/D 変換)	12 bit を ± 20 deg arc で校正
頭部の固定方法	あご台を使用
視標	1 m 前方の直径 5 mm の円
被験者	成人男子 1 名

図3 眼球運動波形および平滑化波形のパワースペクトル

Power spectrum of eye movement and it's smoothed waveform using wavelet and FIR filter.

図5 眼球運動波形の平滑化の比較
Comparison of smoothing methods.

図4 平滑化波形のパワースペクトル：眼球運動と乱数データの比較

Powerspectrum of eye movement and random number.

マザーウェーブレットとしてオーダが9のダウベシイズ・ウェーブレットを用い、 2^{14} すなわち16384点のデータに対してウェーブレット変換を行い、高い周波数成分に相当する上位3レベルを除いた逆変換から平滑化波形（以下、ウェーブレット平滑化波形）を求めた。この逆変換において上位3レベルは 2^3 すなわち8データ点の解像度に相当し、200 Hzのサンプリング周波数に対し約20 Hzのカットオフに相当する。

3.1 ローパスフィルタとしてのウェーブレット解析のフィルタの周波数特性

固視時における左眼水平方向の眼球運動および、そのウェーブレット平滑化波形とFIRフィルタ（その周波数特性は図1に示されたトレマーと呼ばれる不随意眼球運動を除去することを目的とし、位相遅れの少ないことで知られる線形ローパスフィルタであり、計算は200 Hzのサンプリングに対して7データ点間隔

の移動平均で置き換えた。以下、FIR平滑化⁶⁾）のパワースペクトルを図3に示す。ウェーブレット平滑化によるフィルタ特性は15~20 Hz付近にカットオフを持つローパスフィルタの特性を示す。20 Hz付近以上の周波数領域において、FIR平滑化では原波形のパワースペクトルと比較して高周波成分の混入が推定される⁶⁾が、ウェーブレット平滑化波形では高周波成分の混入は少ない。また、ウェーブレット平滑化波形ではローパスフィルタによる20 Hz以下への影響はほとんど受けていないことが、図3における原波形のパワースペクトルとの比較および、図4に示す16384点の乱数で構成された時系列データをウェーブレット平滑化した場合に20 Hz付近以下で示す平坦なパワースペクトルと比較して明らかである。一方、20 Hz以下のフィルタ特性に関してウェーブレット平滑化およびFIR平滑化の特性間に有意差は見られず、フィルタの影響も受けていない。なお、図3に示すFIR平滑化において、カットオフ周波数を低くするために移動平均の幅を7データ点から9データ点に上げ、20 Hz付近におけるパワースペクトルの肩の落ち方をウェーブレット平滑化に近づけて評価した結果、以下で述べる定性的な比較には影響しないことを確認した。

3.2 波形を用いた平滑化法の比較

1.25秒間にわたる注視時の左眼水平方向の眼球運動の波形および、ダウベシイズ・ウェーブレットによるウェーブレット平滑化波形およびFIR平滑化波形を図5に示す。FIR平滑化波形と比較してウェーブレット平滑化波形では、高いオーダのウェーブレットを用いたためにダウベシウズのウェーブレットが非対称フィルタであるにもかかわらず有意な位相遅れは見られない。図中○印で示したサッカードが生じた部分では、ウェーブレット平滑化波形の位相再現の方が原波形に忠実である。また、固視時の不随意眼球運動と

図 6 左眼水平方向の眼球運動の位置-速度のアトラクタ表示：ウェーブレット平滑化と FIR フィルタ平滑化の比較

Attractor representation of position-velocity.

図 7 FIR 平滑化視線軌跡の加速度ベクトル表示
Vector representation of acceleration of eye movement smoothed by FIR filter.

して知られ、その高周波成分に相当するトレマーは FIR 平滑化では充分には取り除かれませんが、ウェーブレット平滑化ではトレマー成分がほとんど見られない。このことは、ウェーブレット解析では高周波成分の混入を減少させることが可能であるとする 3.1 節の結果と一致する。

3.3 時間微分におけるノイズと眼球運動のアトラクタ表示

位置波形-速度波形のアトラクタ表示⁶⁾におけるウェーブレット平滑化と FIR 平滑化との比較を図 6 に示す。3.2 節で述べたように、FIR 平滑化と比較してウェーブレット平滑化波形では高周波成分の混入が少ないためノイズの少ない時間微分波形が得られる。ウェーブレット平滑化では明確なアトラクタの構造が得られ、軌道の中心の位置がその軌道を描いた時間における固視の中心位置に相当し、軌道半径が大きいほ

ど、速く大きな振幅の固視であることを示す。FIR 平滑化ではアトラクタがノイズに埋もれ、その構造は明らかではない。これらのアトラクタ表示は眼球運動の力学系としての定性的理解に有効であり、位置波形-加速度波形によるアトラクタ表示も同様である。なお、図 6 に相当するウェーブレット平滑化波形の他の表示法による表示は図 8 に示す。

3.4 視線軌跡の加速度表示

視線の軌跡上の各点に FIR 平滑化波形の各成分の加速度をベクトルとして表示した例を図 7 に示す。図 7 中の楕円 (i) に示す部分はマイクロサッカードによる直線的な運動であるが、FIR 平滑化波形では 2 階の時間微分から得られた加速度ベクトルが視線軌跡に沿って整列することはほとんどない。一方、図 8 (d) に示すウェーブレット平滑化波形の場合、視線の軌跡に沿ってベクトルが整列し、良い平滑化近似であることを示す。

4. 応用 1：固視における眼球運動の微視的評価

固視微動では、マイクロサッカードにより固視位置が急激に移動する。これは「固視位置の散らばり」(scatter of fixation positions) として知られている²¹⁾。従来、ドリフトとされた眼球運動の水平成分と垂直成分について位置-加速度のアトラクタ表示等を用いて分析する。その結果、固視位置における固視点に加え、眼球運動の各方向の成分について独立に固視位置があり、結果的にドリフトを生じる場合があることが示唆された。

4.1 水平方向と垂直方向の固視微動

固視位置は同時に生じることもあるが、図 8 (a), (e) に示すように、垂直方向とは独立に水平方向にしばしば生じる。図 8 (a), (e) 中の波形に振られた番号 (i) ~ (viii) は、図 8 の他の図中における番号と対応し、各々同時刻の波形に相当する。図 8 (b), (c), (f), (g) に示す左右眼の水平方向、垂直方向、各々の加速度と位置のアトラクタ表示では、図中の番号で示された固視位置に相当する付近で各々振動、すなわちその点からずれた場合、その点に引き戻す加速度が作用していることを示す。例えば、図 8 (b) の図中に示す (ii) の固視位置での振幅は 0.05 ~ 0.1 deg arc で、サブ秒程度の時間で 0.2 ~ 1 deg arc の振幅の水平方向のマイクロサッカードにより、他の固視位置へ移動する。図 8 (f) においてほぼ同一の固視位置となる図中 (iv) および (vi) に対応する領域は図 8 (h) において、垂直方向にほとんど固視運動のないドリフト様となる。

図 8 視線の加速度の表示
A representation of acceleration of eye movements.

以上、垂直とは独立に生じる水平方向の固視位置について述べたが、垂直方向もその頻度は相対的に少ないが水平方向とは独立した固視位置がある。両方向同時に固視する通常の固視も含めて、巨視的な固視点を形成する。ただし、水平方向と垂直方向に独立な固視は視線の軌跡上ではドリフト様になるが、位置-加速度のアトラクタ表示ではその固視位置とマイクロサッカードの識別が容易である。

4.2 水平方向と垂直方向に独立な固視

水平方向と垂直方向とにおいて互いに独立に生じる固視位置はドリフト程度の振幅であり、水平方向と垂直方向の眼球制御系において異なる注視機構が固視微動のレベルでも示唆される。随意眼球運動の場合、垂直方向とは独立した水平方向の眼球の眼窩内位置のコーディングがネコを用いた生理実験で知られ²²⁾、ヒトの場合では中枢障害の患者の症例から眼球運動系の中核内機構は、水平系と垂直系の2つの系から構成されていることが示されている²³⁾。

4.3 水平方向と垂直方向に独立なマイクロサッカード

水平方向と垂直方向とにおいて独立に生じる固視と同様に、マイクロサッカードは図8(a), (e)における固視位置の遷移(i)~(ii)または(iv)~(v)に示すように、水平方向と垂直方向の眼球運動が同期して常に生じるとは限らない。しかし、両眼間における同一方向の眼球運動に関してほぼ同期して生じる。このことは不随意的固視微動に関して、マイクロサッカードと同一の制御機構を持つとされるヒトの随意的サッカード²⁴⁾において「水平方向と垂直方向の異なるフィードバックパルス生成器の存在が示唆される結果が得られた」結果²⁵⁾に一致する。以上述べた測定結果は後述する斜方固視の場合においても同様であった。

5. 応用2：斜方固視時の眼球運動

正面を固視する第1眼位、第1眼位から視線をずらし上下左右を固視する第2眼位、および第1眼位から視線をずらし斜め上方下方を固視する第3眼位における注視時²⁶⁾の各眼位における加速度の大域的なオフセットを、3次の統計モーメント（スキューネス）を用いて示した。眼球運動に加わる微小な力のオフセットをスキューネスのベクトル表示で評価することにより、従来の手法では検出困難な視覚疲労の客観的評価に応用可能性が示唆される。

5.1 測定条件・解析方法

眼球運動の測定は表5に示す実験条件で、バイトボードを用いたブルキニエ法による高い精度の測定を行

表5 斜方固視の実験条件

Experimental conditions: the secondary and tertiary positions.

眼球運動の測定方式	二重ブルキニエ反射光法による片眼の測定
サンプリング周波数	100 Hz
測定時間	5 分間
校正 (A/D)	12 bit を ±20 deg arc で校正
頭部の固定方法	バイトボードを使用
視標	1 m 前方の 12 min arc, 赤
視標方位	第1眼位: (0, 0), 単位: deg arc 第2眼位: (±6, 0), (0, ±6) 第3眼位: (±4.24, ±4.24)
被験者	成人男子 2 名

図9 斜方固視時の加速度の3次の統計モーメント
Statistical third order moment of acceleration.

った。ウェーブレット平滑化された眼球運動の各方向成分について、加速度の統計分布の偏りを次式で定義された平均 $\bar{X}$ 、標準偏差 σ の N 個のデータ X_j に対するスキューネス²⁷⁾を求める。

$$\text{Skewness}(x_1, x_2, \dots, x_N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \right]^3 \quad (5)$$

5.2 解析結果

図9に、各固視位置における水平方向、垂直方向の眼球運動の加速度のスキューネスを2次元ベクトルで表示する。ほとんどの第2眼位および第3眼位に相当する方向で、巨視的にわずかながら、第1眼位への復元力を示唆する求心的な加速度が示されている。ただし、右および右下の眼位では瞬目が多く、解析不能であった。

6. 応用3：瞬目の検出および除去

表5に示された実験条件下で、真正面の視標注視時

(a)

(b)

図 10 瞬目の除去
Elimination of blink.

における左眼水平眼球運動の5秒間にわたる原波形およびウェーブレット平滑化波形を図10(a)に示す。原波形中のデルタ関数様のピークは瞬目により生じ、眼球運動の波形ではない。このピークの幅は、約30 msである。これらのピークはウェーブレット平滑化波形では除去され、自然な波形で瞬目部分がウェーブレット平滑化により補間された。一方、瞬目の除去が不十分な場合を図10(b)に示す。この場合のピークの幅は約100 msである。以上、閉眼過程が完了する前に開眼過程が開始する微小瞬目²⁸⁾に相当すると推定される50 ms程度以下の瞬目の除去は可能であるが、300 msで全過程が完了する完全瞬目²⁹⁾に相当すると推定される瞬目の除去は不十分である。

7. む す び

本研究では、ウェーブレット解析を注視時眼球運動の平滑化に応用し、位相遅れの少ない線形フィルタとして知られるFIRフィルタを用いた平滑化と比較し、トレマーの除去において良好な結果を得た。そのため、FIRフィルタを用いてトレマーを低減する場合は容易ではない速度、加速度を求めることが容易となり、データサンプリング周波数の精度で、位置-加速度のアトラクタ表示および視線軌跡上における加速度のベクトル表示法を提案した。これらの応用として、

固視時のドリフト成分について、水平方向と垂直方向における独立な固視の可能性と制御系の独立性の可能性について述べた。同様にマイクロサッカドについても、各方向に独立に生じることがしばしば見られることを示した。また、斜方固視すなわち、第2眼位および第3眼位における眼球の加速度の統計分布の偏り(スキューネス)のベクトル表示により、第1眼位へのオフセットを示した。アトラクタ表示およびベクトル表示は負荷に対してロバストな視覚疲労等の微視的な視線分析への応用可能性を示唆する結果を得た。

本研究の機会を与えて下さったソニー(株)中央研究所ディスプレイ研究部 田中義禮部長と石本光課長に感謝します。ウェーブレット解析を用いて分析した斜方固視のデータは著者が(株)ATR視聴覚機構研究所へ出向中に眼球運動の参照データとしてSRIへ測定依頼したものである。SRIのデータを使わせていただいたATRおよび、SRIへの委託研究を許可して下さった淀川英司社長(現 工学院大学教授)、上野圭一視覚研究室室長(現 NTTマルチメディアシステム総合研究所)に感謝します。ATRでの共同研究者であり、本研究について有益な御助言を頂いたNHK放送技術研究所の山田光穂主任研究員に感謝します。御自身の投稿中の論文をもとに快く議論して頂いたNTTヒューマンインタフェース研究所の境野英朋主任研究員に感謝します。

【参 考 文 献】

- 1) 三橋: “1. 画像の評価技術の動向: 1-1 主観評価技術の動向”, テレビ誌, **45**, 3, pp. 287-293 (1991)
- 2) 大塚: “1. 画像の評価技術の動向: 1-2 客観評価技術の動向”, テレビ誌, **45**, 3, pp. 293-298 (1991)
- 3) 畑田: “小特集: 映像観視時の生体の反応 1. 総説”, テレビ誌, **50**, 4, pp. 419-422 (1996)
- 4) 山田, 福田: “画像における注視点の定義と画像分析への応用”, 信学論, **J69-D**, 9, pp. 1335-1342 (1986)
- 5) 境野, 鉄谷, 岸野: “最大エントロピー法と高次モーメント特徴量に基づく眼球運動パターンの時系列解析”, 信学論, **J76-A**, 8, pp. 1027-1041 (1993)
- 6) 吉松, 山田: “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”, テレビ誌, **49**, 8, pp. 1042-1051 (1995)
- 7) 榊原: “ウェーブレット ビギナーズガイド”, 東京電機大学出版局 (1995)
- 8) J. Kováčević, I. Daubechies eds.: “Scanning The Special Issue on Wavelets”, Proc. IEEE, **84**, 4, pp. 505-688 (1996)
- 9) 古賀: “2章 眼球運動測定法”, 眼球運動の実験心理学, 荳坂, 中溝, 古賀編著, pp. 33-57, 名古屋大学出版会 (1993)
- 10) 田多, 山田, 福田: “まばたきの心理学”, 北大路書房 (1991)
- 11) 石山, 山田, 磯野: “ハイビジョン立体画像観察時の瞬目に關する分析”, テレビ誌, **49**, 8, pp. 1032-1041 (1995)
- 12) 山田: “2章 視覚のメカニズム”, ATR編, 視聴覚情報科学, pp. 48-50, オーム社 (1994)
- 13) R. M. Steinman, J. Z. Levinson: “The Role of Eye Movements in the Detection of Contrast and Spatial Detail”, Reviews of Oculomotor Research, **4**, Elsevier, pp. 115-

- 116 (1990)
- 14) 境野, 鈴木, 徳永: “ウェーブレット多重解像度解析に基づく眼球運動のテクスチャー依存性解析”, 信学論 A 投稿中
 - 15) J. M. Findlay: “Frequency Analysis of Human Involuntary Eye Movement”, *Kybernetik*, **8**, pp. 207-214 (1971)
 - 16) S. G. Lisberger, C. Evinger, G. W. Johanson, A. F. Fuchs: “Relationship Between Eye Acceleration and Retinal Image Velocity During Foveal Smooth Pursuit in Man and Monkey”, *J. Neurophysiology*, **46**, 2, pp. 229-249 (1981)
 - 17) 境野, 岸野: “眼球運動下の視空間の安定知覚のための適応的カルマンフィルタモデル”, 信学論, **J79-A**, 2, pp. 383-398 (1996)
 - 18) 吉松: “講座 複雑性への挑戦 カオス応用システム”, テレビ誌, **50**, 4, pp. 450-458 (1996)
 - 19) W. H. Press, et al.: “Numerical Recipes in C 2-nd ed.”, pp. 558-560, Cambridge Univ. Press (1992)
 - 20) 山口: “カオス・フラクタル・ウェーブレット”, 数理科学, **354**, pp. 5-10 (1992)
 - 21) H. B. Barlow: “Eye Movements during Fixation”, *J. Physiol.*, **116**, pp. 290-306 (1952)
 - 22) 藤田: “4 眼球運動のモデル”, 川人ほか編著, 認知科学 4 運動, pp. 116-117, 岩波書店 (1994)
 - 23) 小松崎ほか: “眼球運動の神経学”, p. 2, 医学書院 (1985)
 - 24) R. H. S. Carpenter: “Movements of The Eyes 2-nd Edition Revised and Enlarged”, pp. 131-135, London: Pion (1988)
 - 25) W. Becker, R. Jurgens: “Human Oblique Saccades: Quantitative Analysis of The Relation Between Horizontal and Vertical Components”, *Vision Res.*, **30**, 6, pp. 893-920 (1990)
 - 26) 小松崎ほか: “眼球運動の神経学”, p. 159, 医学書院 (1985)
 - 27) W. H. Press, et al.: “Numerical Recipes in C 2-nd ed.”, pp. 610-615, Cambridge Univ. Press (1992)
 - 28) 田辺, 杉山: “心理実験のための瞬目の自動抽出法”, 信学論, **J76-D-II**, 5, pp. 959-966 (1993)
 - 29) 星野: “小特集: 映像観視時の生体の反応 4 注意と瞬目”, テレビ誌, **50**, 4, pp. 436-442 (1996)

よしまつ ひろし
吉松 浩 1982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)入社。1990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。1993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。