

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 5 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420422

研究課題名(和文) モルフォロジフィルタ(特に多重解像度DPT)による新しい生体環境信号解析法の開発

研究課題名(英文) Methods for biological-environmental data analysis by morphological filters(like DPT.)

研究代表者

吉川 昭(KIKKAWA, Sho)

近畿大学・生物理工学部・研究員

研究者番号：30075329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：(1)2つのMorphologicalフィルタとしてのLフィルタとUフィルタおよびそれにより構成されるDPT(Digital pulse transform)を紹介した。(2)ピラミッドアルゴリズムによるDPTを用いた突発的信号検出法を提案した。特に眼球運動におけるsaccade検出法を提案しその線形フィルタに勝る検出能を示した。この方法は広く生体環境信号における信号検出に有効である。(3)通説に反し、medianフィルタの信号の形状保存平滑化能はかなり実際的な広い条件下で線形フィルタより劣ることを理論的に示すとともに、シミュレーション実験でも確かめた。

研究成果の概要(英文)：(1) We introduced L and U filters having not been well-known as morphological filters and the digital pulse transform (DPT) constructed of L and U filters. (2) We proposed a new method for detecting randomly generated signals buried in noise, in particular, a new method to detect saccades in human eye movement data. We attained error-free detection of the saccades by this method which has not been achieved by traditional linear filters. This method can be widely applied to detection problems in biomedical environmental data processing. (3) Against the commonly accepted theory that median filtering outperforms traditional linear filtering in preserving signal edges while reducing noise, we theoretically proved that moving average filter is a better smoother preserving signal edges than the median filter under a practical wide range condition.

研究分野：情報工学

キーワード：Morphological フィルタ DPT 生体環境信号 眼球運動 saccade medianフィルタ 形状保存フィルタ

1. 研究開始当初の背景

(1) Rower によって提案された L_n および U_n ($n=1,2,\dots$) フィルタは grey scale morphological フィルタの基本要素であり、これらを組み合わせた $L_n U_n$ および $U_n L_n$ は非線形 smoother の一種である。非線形フィルタとしてよく知られた median フィルタの動作は複雑で動作予測が困難なのに対して $L_n U_n$, $U_n L_n$ フィルタの数学的性質は明確であり、線形フィルタに劣らず動作予測が容易である。また、median フィルタの最大の特徴の一つはエッジ保存能力にあるとされていた。しかし、低 S/N 入力に対するその出力は線形フィルタと同程度のエッジ浸食性を持つことが明らかになった。一方 DPT 出力は低 S/N に対しても良好なエッジ保存能力を維持すると思われ、我々もそれを確認しつつある。

(2) 多重解像度解析 wavelet 変換も線形平滑化(低域フィルタ)によるエッジ浸食性をもつ。これを解決するための平滑化フィルタを median フィルタに置き換えた「median 変換」が提案されている。しかし wavelet 変換はエネルギー保存則を満たすが median 変換は保存物理量を持たず、あくまで heuristic なものと言える。また、median フィルタの動作予測困難性はここでも問題となる。これに対し $L_n U_n$, $U_n L_n$ を smoother としてもつ DPT(discrete pulse transform)は全変動を保存する多重解像度変換であり、その動作予測も容易である。一般に、全変動は信号の滑らかさを規定する重要な数学的概念であるが、これに基づく信号処理は強く非線形であり、その理論は難解、もしくは数学的構造がつかめない、などといった理論的問題が生じる。しかし、数学的構造とその理論が明確でその動作予測が容易な DPT はこの問題を解決すると期待される。また DPT は非線形変換であるにもかかわらず、直交射影に似た性質を持ち入力の再構成が可能である。

(3) $L_n U_n$, $U_n L_n$ フィルタおよび DPT は、これらの出力が必ず $n+2$ 単調(あい続く $n+2$ 点が単調)となる顕著な特徴をもつ。median フィルタはこのような性質を持たない。この性質は雑音に埋もれた局所単調信号の検出やフラクショナルブラウン運動(fBM)のように指数法則に従うスペクトルの指数の推定に大いに役立つであろう。さらに、 $L_n U_n$, $U_n L_n$ フィルタおよび DPT の smoother は上側または下側の包絡線を抽出する動きを持ち、この性質の信号解析への応用も多々考えられる。

(4) 固視時の眼球運動(固視微動)における micro saccade(MS)を正確に検出・認識することは視覚生理や心理の研究に極めて重要である。我々はこれに DPT が有用であることを確かめつつある。

2. 研究の目的

Median フィルタをはじめとする信号・画像処理分野における morphological フィルタは、見た目の簡易さにも関わらずその数学的性質

は明確でなく、動作予測が困難である。一方、morphological フィルタの一種 LU フィルタとそれによる DPT は素直な良い数学的性質を多く持ち、median フィルタを補完ならびに凌駕すると考えられる。本研究は、主として DPT の動作の見通しの良さ、出力の局所的単調性および疑似直行展開的な信号分解特性に注目し、LU フィルタと DPT (以後まとめて単に DPT ともいう)の、またそれと合成型 median フィルタとの組合せの生体環境信号解析への応用を図る。そしてこれらの大きな潜在能力を明らかにして信号解析分野に一石を投じる。

3. 研究の方法

- (1) DPT の morphological フィルタ内の位置づけの理論的検討。特に opening, closing 演算との関係を明らかにする。
- (2) median フィルタの動作の理論検討。
- (3) DPT の局所単調性の検討とその応用の理論検討。
- (4) その他、DPT と median フィルタあるいは線形フィルタの合成型フィルタの理論検討。
- (5) DPT を smoother とみなし、wavelet 変換、Fourier 変換などの smoother 部分をこれ置き換えた新しい信号変換法の理論検討。
- (6) 上記種々の理論検討に対し、シミュレーション実験でその理論の裏付けを行う。
- (7) 種々の生体環境信号(脳波、心電図、移動体信号、眼球運動など)の計測。
- (8) これら各種信号に埋もれた突発性信号検出と認識の問題の洗い出し。
- (9) 理論検討およびシミュレーション検討を行った新しい信号解析法の生体環境信号解析への応用を試みる。

4. 研究成果

以下、DPT の特徴を利用した新しい突発波検出法の saccade 検出への具体的応用と、代表的 morphological フィルタとしての median フィルタが広い条件下で線形フィルタに劣ることに関する理論結果を示す。

(1) DPT を用いた新しい突発波検出法を用いた saccade 認識

原データとその DPT:

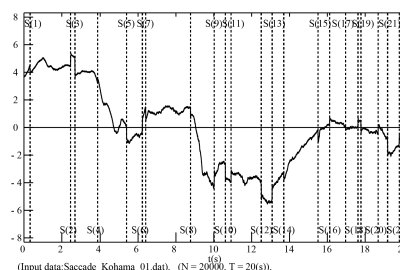


図 1: Saccade データ。縦点線は saccade ($S(i), i=1, \dots, 22$) の始点と終点。ただし両者は接近しているため本図では 1 本

に見える。

saccade データ $x_{org}(i)$ を図 1 に示す。
DPT 操作により $x_{org}(i)$ は次々と平滑化成分 $C_n(i)$ と粗成分 $D_n(i)$ ($n=1, \dots$) に分解される (図 2 参照)。

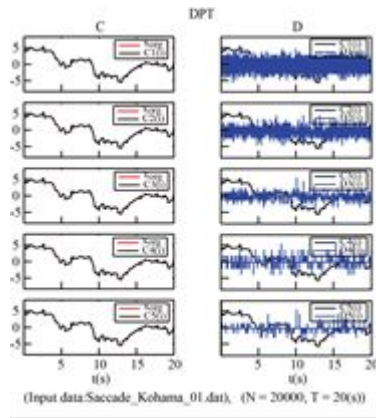


図 2 DPT 解析。左列: $x_{org}(i)$ (赤線)、 $C_n(i)$ (黒線)。右列: $D_n(i)$ (青線)。

Saccade 始点と終点の検出:

DPT は全変動保存解析 ($C_n(i)$ と $D_n(i)$ の全変動の和が $C_{n-1}(i)$ の全変動に等しい) である。
 $D_n(i)$ は stage n における平滑化量を示す。
 $C_n(i)$ は $n+2$ 単調であるから、 $n+2$ 単調の saccade は $C_n(i)$ 内に保存される。従って $C_n(i)$ に微弱な 2-単調パルス (1 点パルス) を重畳させてこれに 1 回 DPT を施せば、それで得られる粗成分は急傾斜を示す saccade の始点と終点以外で 2-単調パルスの列となり、そのパルス列ブロックの始点と終点がそれぞれ saccade の終点と始点の目安となる (図 3 参照)。

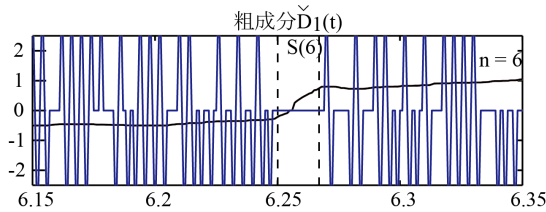


図 3 黒線: saccade、青線: 粗成分パルス列。

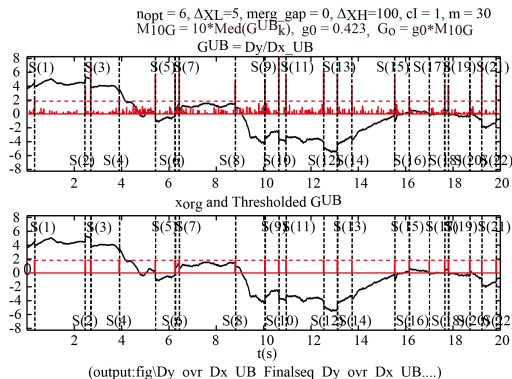


図 4 閾値処理結果

Saccade 統計量と閾値処理:

推定された k 番目の saccade の平均傾斜 G_k (saccade の振幅 - saccade 終点の振幅と始点の振幅の差 - を持続時間 - 始点と終点の間隔 - で除したものを saccade 特徴量と定め、振幅 G_k のパルスを k 番目の推定 saccade の位置に立てて得られるパルス列を $\varphi(i)$ とする。図 4(a) の赤線が $\varphi(i)$ 、黒線は原データ、黒縦点線は真の saccade 位置を示す。同図 (b) は適当に定めた閾値 G_0 (赤点線) により処理された結果で、 $\varphi(i) > G_0$ の時刻 i で $\varphi(i) = G_0$ 、それ以外では $\varphi(i) = 0$ とした。

閾値と Saccade 検出精度:

図 5 は G_0 を適当に基準化した閾値 g_0 に対する検出誤りの数 (false positive 数 + false negative 数) の変化を示す。

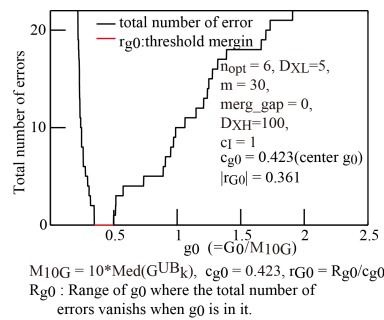


図 5 基準化閾値 g_0 に対する検出誤り数 (黒線)。赤線は検出誤り 0 の範囲。

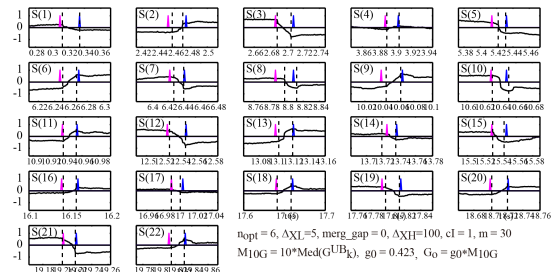


図 6: 検出された saccade とその始点と終点パルス。黒線: saccade 波形 $x_{org}(i)$ 、赤線: 始点パルス、青線: 終点パルス、黒点線: 真の始点と終点位置。

検出誤り 0 をもたす相対閾値の範囲 R (図 5 赤線の長さ) をこの範囲の中心閾値 c で除したものを閾値余裕 w と呼ぶと $w = R/c = 0.361$ であった。
図 6 は相対閾値を $g_0 = c$ と置いたときに検出された全 22 個の saccade 波形とその始点パルスおよび終点パルスを示す。

図 7 にこれら始点、終点、および中心時刻推定誤差 (= (始点推定時刻 + 終点推定時刻) / 2 - 真の中心時刻) の経験累積分布を示す。ただし、本図の推定誤差は、対応する saccade の持続時間で基準化した相対推定誤差である。始点、終点および中心時刻の相対推定誤差の

範囲はそれぞれ $[-0.8, 0.333]$ ms、 $[-0.25, 0.25]$ ms および $[-0.438, 0.222]$ ms であった (始点および終点時刻の絶対推定誤差の範囲はそれぞれ $[-11, 5]$ ms および $[-4, 4]$ ms であった。)。つまり、始点時刻および終点時刻の推定誤差の絶対値はいずれも saccade の区間長を超えることなく、特に終点時刻推定誤差は saccade の区間長の 0.5 倍以下である。

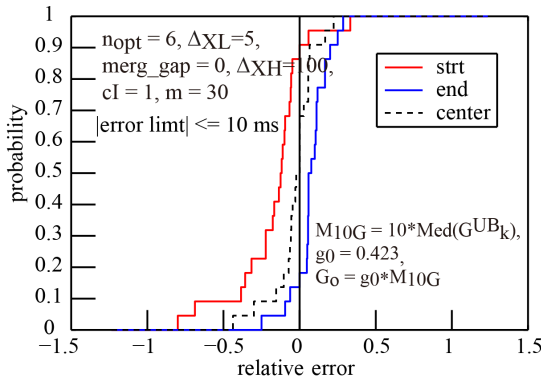


図 7: 検出された 22 個の saccade の始点、終点および中心時刻相対推定誤差の経験累積分布 (ECD)。ここで相対誤差とは、推定誤差を各 saccade の持続時間で基準化したものである。赤線: 始点時刻推定誤差の ECD、青線: 終点時刻推定誤差の ECD、黒点線: 中心時刻推定誤差の ECD。

以上、DPT による saccade 検出の提案を行った。対照実験として、今回用いたものと同じデータにより通常行われている低域微分フィルタによる saccade 検出を行ったが、その結果は閾値余裕は 0、すなわち positive および negative いずれの誤りも 0 にできず、ここでの提案手法の有用性と強力性が示された。DPT は wavelet 解析がそうであるように、信号をピラミッドアルゴリズムにより順次平滑化成分と粗成分に分離する。このとき stage n における平滑化成分は $n+2$ 単調であることが保証されており、本 saccade 検出はこれを利用して人工雑音を加える手法を用いたものであるが、この手法は広く一般の信号検出に応用できる。

(2) Median フィルタと移動平均フィルタの比較

Morphological フィルタの代表とされる median 平滑化フィルタは高いエッジ保存能と平滑化機能を持つとされるが、低 S/N 入力に対しては必ずしも明らかでない。ここではむしろさほど S/N が低くなくても、尾の短い分布の雑音に対しては、線形フィルタの方が median フィルタより高いエッジ保存能と平滑化機能を持つことを明らかにした。

Step 入力に対する median フィルタ出力:
離散時間 $t = \{-N, -N + 1, \dots, N - 1\}$ で定

義された入力信号 $x(t) = s(t) + n(t)$ を考える。ただし、 $s(t)$ はステップ信号 $s(t) = -1/2$ ($-N \leq t \leq -1$)、 $= 1/2$ ($0 \leq t \leq N - 1$)、 $n(t)$ は平均値 0、分散 σ_n^2 の定常白色雑音である。入力 $x(t)$ に対する median フィルタの出力を

$y_M(t) = \text{med}\{x(t-w), \dots, x(t), \dots, x(t+w)\}$ とする。雑音 $n(t)$ の確率密度関数 (pdf) を $f(n)$ とすると、 $t \leq -1$ に対する入力 $x(t)$ の pdf は $g_1(x) = f(x+1/2)$ 、 $t \geq 0$ に対する pdf は $g_2(x) = f(x-1/2)$ で与えられる。このとき、 $t \notin [-w, w-1]$ の場合 Median フィルタの出力の pdf $f_M(x, t)$ は次で与えられる。ただし、 $G_i(x)$ は $g_i(x)$ の累積分布関数である。

$$f_M(x, t) = \begin{cases} \frac{M!}{w!w!} g_1(x) G_1^w(x) (1 - G_1(x))^w & (t \leq -(w+1)) \\ \frac{M!}{w!w!} g_2(x) G_2^w(x) (1 - G_2(x))^w & (t \geq w) \end{cases} \quad (10)$$

一方、 $t \in [-w, w-1]$ の場合の $f_M(x, t)$ は少し面倒な式操作により次のように求まる。

$$\begin{aligned} f_M(x, t) &= f_1(x, t) + f_2(x, t) \quad (-w \leq t \leq -1) \\ &= f_1(-x, -t-1) + f_2(-x, -t-1) \\ &\quad (0 \leq t \leq w-1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_1(x, t) &= (w+|t|) g_1(x) \sum_{k=|t|-1}^w C_k^{w-|t|-1} C_k^{w+|t|-1-k} \\ &\quad * G_1^k(x) (1 - G_1(x))^{w+|t|-1-k} \\ &\quad * G_2^{w-k}(x) (1 - G_2(x))^{k-|t|+1} \\ f_2(x, t) &= (w+1-|t|) g_2(x) \sum_{k=|t|}^w C_k^{w-|t|} C_k^{w+|t|-k} \\ &\quad * G_1^k(x) (1 - G_1(x))^{w+|t|-k} \\ &\quad * G_2^{w-k}(x) (1 - G_2(x))^{k-|t|} \end{aligned}$$

数値計算結果:

上記 median フィルタの出力分布理論計算結果と通常の移動平均フィルタの出力分布から、両者の性能比較を行った。図 1 は 3 種の雑音 (一様雑音、Gauss 雑音、Laplace 雑音) に対する両フィルタ出力のバイアス - 分散特性を比較したものである。横軸がバイアスの大きさ、縦軸が分散の大きさを示す。図上段が一様雑音、中段が Gauss 雑音、最下段が Laplace 雑音に対する結果である。

各図とも入力雑音の分散 σ_n^2 をパラメータにしたバイアス - 分散特性を示す。縦軸の分散は入力分散で正規化してあるため移動平均フィルタの特性は入力雑音分散に依らずただ 1 本の直線となる。これに対して median フィルタの特性は入力雑音分散に大きく依存する。この特性曲線が左下方向に寄れば寄

るほどフィルタが高性能であることを意味する。

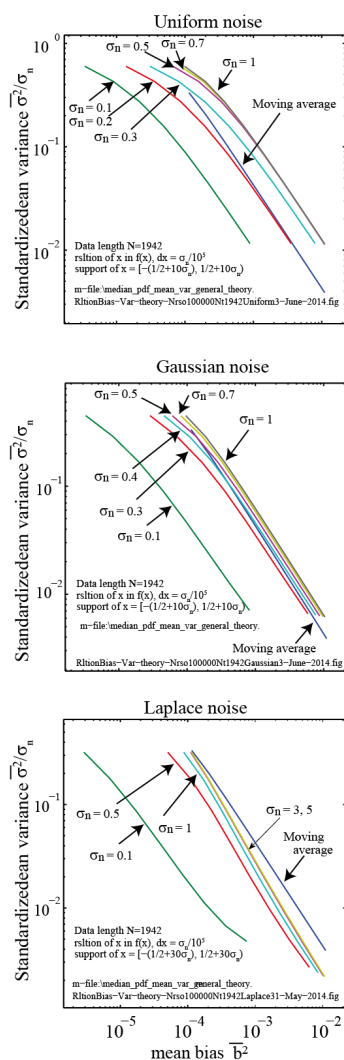


図 1 各種雑音に対する median フィルタと移動平均フィルタの出力特性。

この図から、一様分布雑音、ガウス雑音に対してそれぞれ $\sigma_n \leq 0.2$ および $\sigma_n \leq 0.3$ であれば median フィルタが移動平均より優れているが、これら以上の雑音分散に対しては移動平均フィルタの方がよい特性を持つことが分かる。しかし、Laplace 雑音に対しては、ほとんど完璧に median フィルタの特性が移動平均に勝る。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

S. Kikkawa, T. Kohama, H. Yoshida, Which is better Median Filter or Linear Filter as a Smoother? Mem. Faculty. B.O.S.T. Kinki Univ. 36, 9-17, 2015, 査読有、
http://kurepo.clib.kindai.ac.jp/modules/xoonips/listitem.php?index_id=

18630

M. Kodama, T. Kohama, H. Yoshida, A saliency based motion detection model of visual system considering visual adaptation properties, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2015, 6658-6661 2015、査読有、

<http://emb.citengine.com/event/embc-2015/search-author?l=a#K>

鈴木和博、中迫 昇、中山雅人、篠原寿広、上保徹志、位相干渉と直流成分の除去に基づく 0m から計測可能な 2ch 音響測距法、電気学会論文誌 C 135(11) 1349-1350 2015、査読有、DOI:<http://doi.org/10.1541/ieejciss.135.1349>

中井裕真、大谷尚平、加納悠史、山本雅也、上田慎一、栗原正幸、小濱剛、吉田久、音声および身体応答による認知負荷がマイクロサッカード発生頻度に及ぼす影響、電子情報通信学会技術研究報告 115(232(HIP2015 72-87)) 79-84、2015、査読なし

http://jglobal.jst.go.jp/detail/?from=API&JGLOBAL_ID=201502209473210726

S. Honda, T. Kohama, T. Tanaka, H. Yoshida, Quantitative assessments of arousal by analyzing microsaccade rates and pupil fluctuations prior to slow eye movements, Conference Proceedings, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference 2014 2229-2232、査読有、DOI: 10.1109/EMBC.2013.6609949

鈴木和博、中迫 昇、中山雅人、篠原寿広、上保徹志、福島学、クロススペクトル法を用いた位相干渉に基づく音響測距法による対象物位置推定、電子情報通信学会論文誌 A J97-A(4)、343-346 2014、査読有、

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j97-a_4_343&category=&year=2014&lang=J&abst=

中迫昇、英慎平、篠原寿広、中山雅人、上保徹志、リニアチャープ音の干渉に基づく音響測距法-雑音環境下における性能評価と雑音対策の試み、電気学会論文誌、134(11)、1926-1927、2014、査読有、DOI:10.1541/ieejciss.134.1626

小濱剛、吉川昭、吉田久、マイクロサッカードおよびドリフト眼球運動の解析に基づく注意集中度の定量化、電子情報通信学会技術研究報告 114(226(HIP2014 43-59))、87-92、2014、

査読なし

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009950336>

〔学会発表〕(計 18 件)

本多進哉, 中迫昇, 篠原寿広, 上保徹志, 中山雅人, 1ch マイクロホンの観測信号と疑似観測信号間のクロススペクトルによる音源距離推定法とその実験的検討、平成 27 年度電気関係学会関西連合大会講演論文集、2015 年 11 月 14 日、摂南大学、寝屋川キャンパス(大阪府、寝屋川市)

中迫昇, 英慎平, 中山雅人, 篠原寿広, 上保徹志, リニアチャープ音の干渉を用いた等速移動体の距離と速度の実用的推定法、第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '15) 2015 年 5 月 20 日、中央電気倶楽部(大阪府・大阪市)

本田彰吾, 小濱剛, 吉田久, 固視微動と瞳孔径変動解析に基づく覚醒水準の客観的評価、映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会技術報、39(11(HI2015 45-55/3DIT2015 11-21)) 25-28 2015 年 3 月 10 日、東京農工大学小金井キャンパス(東京都・小金井市) 徳留健, 小濱剛, 吉川昭, 吉田久, 固視微動の確率的振る舞いを再現する数学モデル、映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会技術報、39(11(HI2015 45-55/3DIT2015 11-21)) 21-24 2015 年 3 月 10 日、東京農工大学小金井キャンパス(東京都・小金井市) K. Tokudome, T. Kohama, S. Kikkawa, H. Yoshida, A mathematical model of drift eye movements with mean square displacement profile, the 36th annual International IEEE EMBS, 2014/8/28, Chicago(USA).

K. Suzuki, N. Nakasako, M. Nakayama, T. Shinohara, T. Uebo, Robust acoustic distance measurement method based on synchronous addition using cross-spectral method in a noisy environment, the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21), 2014/7/15, Beijing (China). 加納悠史, 小濱剛, 吉川昭, 吉田久, 視覚的注意の集中度合いとマイクロサッカーカード潜時分布の関係、第 53 回日本生体医工学会大会、2014 年 6 月 24 日~26 日、仙台国際センター(宮城県・仙台市)

野口大輔, 小濱剛, 吉川昭, 吉田久, ドリフト眼球運動の解析に基づく注意集中度の定量的評価、映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会、2014 年 3 月 4 日、東京農工大学小金井キャンパス(東京都・小金井市) H. Yoshida, T. Kohama, Evaluation of

visual factors of visually induced motion sickness by analyzing fixation eye movements and heart rate variability, 36th European Conference on Visual Perception, 2013/8/25-29, Bremen(Germany).

T. Kohama, H. Yoshida, Persistent inhibition of microsaccades caused by attentional concentration, 36th European Conference on Visual Perception, 2013/8/25-29, Bremen (Germany).

H. Yamamoto, H. Yoshida, R wave detection for real-time processing using nonlinear transform and dynamic thresholding, the 35th annual International Conference of the IEEE Engineering in medicine and Biology Society(EMBC2013), 2013/7/3-7, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan.

K. Tokudome, T. Kohama, S. Kikkawa, H. Yoshida, A mathematical model for reproducing mean square displacement profile of fixation eye movements, Neuro 2013, 2013/6/20-23, Kyoto International Conference Center, Kyoto(Japan)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 18 件)

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 昭 (KIKKAWA, Sho)

近畿大学・生物理工学部・研究員

研究者番号：30075329

(2) 研究分担者

吉田久 (YOSHIDA Hisashi)

近畿大学・生物理工学部・教授

研究者番号：50278735

中迫 昇 (NAKASAKO Noboru)

近畿大学・生物理工学部・教授

研究者番号：90188920

小濱 剛 (KOHAMA Takeshi)

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号：90295577

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし