

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24240037

研究課題名(和文) 創発的脳機能としての視覚の非線形物理とその応用

研究課題名(英文) Nonlinear Physics of Vision as An Emerging Function of Brain and Its Applications

研究代表者

三池 秀敏 (Miike, Hidetoshi)

山口大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：10107732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非線形物理の知見をベースとして、錯視現象の本質を解明することを目的とした。視覚系の持つ機能やその動的な振る舞いは、視覚系に自己組織化される創発現象であると考えられる。我々はまた、錯視現象の本質の解明を通して、新たな情報処理技術や臨床医学的な応用技術の開発を目指した。

研究成果の第一は、動的錯視として有名な「運動鮮鋭化」現象や、その視覚応答特性(非線形特性)を、反応拡散モデル(変形FitzHugh-Nagumoモデル)により再現できる事を示した。第二は、この知見をベースとしてノイズロバストな運動鮮鋭化手法を提案し、有用な動画像強調手法として特許申請準備を進めている。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed to clarify the origin of visual illusion based on nonlinear physics. We recognize that the functions of visual system and its dynamics can be regarded as emerging phenomena self-organized in the system. On the basis of the fundamental approach, we also try to develop new information technology and new application to clinical medicine.

The most important result is understanding of "Motion Sharpening" based on the FitzHugh-Nagumo model (nonlinear reaction-diffusion model). We found that the nonlinear characteristics of the visual system can be replicated by the analysis of the system by investigating input-output characteristics against to very small amplitude input. On the basis of this founding, we proposed a new noise robust method to realize motion enhancement. Application for a patent is under preparation.

研究分野：非線形科学、視覚情報処理

キーワード：感性認知科学 錯視 反応拡散モデル 非線形物理 ノイズ 確率共鳴 脳機能 運動鮮鋭化

1. 研究開始当初の背景

創発 (Emergence) とは、元々の構成要素の性質からは予測できないような新たな性質が全体のシステムに現れることであり、システムの非線形性や階層構造から生まれる複雑現象である。これまで申請者らは、この創発に関連する非線形科学や自己組織化、複雑系の物理学の実験的研究を続けてきた。最近ではその知見をさらに発展させ、錯視現象の理解や視覚現象の再現、さらにパターン認識 (画像処理) 等の工学的応用を進めてきた。その具体的な研究背景・成果は以下の通りである。

我々の研究の直接の動機となったのは、A. Turing により 1952 年に提案された反応拡散系による形態形成の数理であり、L. Kuhnert らによる光感受性 Belousov-Zhabitsky (BZ) 反応系における画像処理的パターン出現の報告 (1989 年、Nature) である。Turing の理論のキーポイントは、本来不均一な濃度分布を均一にする役割をもつ拡散現象が、ある条件では逆に均一化を妨げ不均一な分布をつくることを示したことである。すなわち、非線形化学反応と互いに競合する二つの拡散現象が結合すれば、安定な「形」が自己組織されることを示した。これは光感受性 BZ 反応では入力光パターンの輪郭抽出や白黒反転パターンの自己組織化現象として現われ、化学反応による自律的画像処理機能ともいえ、視覚系を模擬した現象として紹介された。しかし、出現する「形」は一過性あるいは時間変化するパターンであり Turing のように安定な静止形態は得られない。反応と拡散の支配する系において画像処理的パターンが静止形態として形成されれば、人工的にアルゴリズムを設計することなく、画像処理やパターン認識が自己組織的に実現されることになる。これは情報処理技術の分野に革新をもたらす可能性がある。

申請者らは、反応素子が空間結合した一次視覚野の生理的・機能的特徴に注目し、典型的な非線形振動子モデルである FitzHugh-Nagumo 素子を離散的に結合させ、Turing 条件をもつ数理モデルを提案した。このモデルで、一次視覚野で見られるエッジ検出など視覚の初期過程的な画像処理を実現した (1999 年 DAAAM 国際シンポジウム最優秀論文賞)。一方、J.P. Keener、Y. Nishiura らにより、非線形振動子集団において、振動子間の拡散結合の強さ (結合の空間的離散性) をパラメータとして系のパターン動力学的質的変化の探求も行われているが、Propagation Failure など特殊なパターン形成の例として議論される範囲に留まっている。

我々は最近、空間的離散性をあらわに表現する離散結合反応拡散モデルを提案し、これを用いた動的錯視現象の再現に成功している。

本研究ではこのモデルに確率共鳴・確率同期の概念を加えさらに拡張することで、視覚情報処理の特徴を理解できる数理科学的基盤を築く。さらに、その応用技術の確立を目指す。動的な錯視現象の離散的反応拡散モデルによる再現や、空間的な雑音 (ノイズ) を付加した錯視映像を用いた視覚心理実験は、視覚系の動的な機能や特徴を創発現象として捉え、理解・再現しようとする全く新しい試みである。

2. 研究の目的

ヒトの脳の機能は「思考」「記憶」「認識」の三つに代表される。このいずれにおいても視覚は最も重要な役割を果たす。一方、ここで取り上げようとする錯視や多義図形では、思考や認識の揺らぎが主役を演じ、これは雑音 (カオス) に駆動された確率共鳴の一種と考えられる。本研究では、視覚で演じられる脳の創発性に、非線形科学・自己組織化の物理で培ってきた確率共鳴・確率同期を始めとした新しい概念を導入し、それをベースに錯視現象の本質を解明する。そして視覚系の織りなすダイナミックな振る舞いや機能を創発現象と捉え、それを応用した人の視覚情報処理機能の再現や臨床神経科学への適用により、新たな情報技術の創成や臨床医学技術の開発への道を拓くことを目的とする。

本研究では、非線形振動子間の空間的結合が弱い時に出現する特異なパターン形成を見だし、これによる反応拡散系の自己組織的な画像処理メカニズムの解明を**第一の目標**とする (平成 24-25 年度)。この研究成果を手掛かりとして、各種の運動錯視など視覚システムの特徴を再現する数理モデルを提案する。すなわち、視覚系のように連続画像入力が与えられる場合に、空間離散的結合をもつ反応拡散系では、モデル系のダイナミクス理解と錯視現象との相関の解明が重要で、それを第二の目標とする (平成 24-26 年度)。次に脳や BZ 化学反応系では、外部から印加する雑音によって自己組織化が大きく左右される。これらの知見を背景として、錯視パターンにノイズを加え、人の視覚心理的な応答特性に対する外部雑音の効果を明らかにする。すなわち、視覚心理実験を通し、ノイズレベルの異なる錯視動画像入力に対する視覚心理応答特性 (錯視量等) の解明を第三の目標とする (平成 25-26 年度)。その成果をもとに、臨床心理学あるいは臨床神経科学的な応用を試みる。具体的には、非線形科学の知見である確率共鳴や確率同期現象を手掛かりに、ノイズを含む錯視動画像の心理効果の解析とその臨床神経科学的応用 (例えば健常者と認知症やうつ病患者との診断可能性の検討) を第四の目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、前述の通り4つの研究目標を設定した。この目標を達成するために、

- 1) 非線形科学と視覚心理分野から2名の学術研究員を国際公募により採用し、学際的な研究組織を形成し、提案モデルの改良・解析と視覚心理実験を並行して進める。
- 2) 離散的反応拡散モデルの示す自己組織的な画像処理メカニズムを解明する。特に、モデルの次元依存性、Turing条件の必要性、他の非線形モデルでの検討等を進め理解を深める。また、離散的反応拡散モデルの拡張を進め、視覚現象の創発的自己組織化による再現を試みる。
- 3) 適切なレベルのノイズを重畳した錯視映像を用い、視覚心理実験の結果と本研究で新規に提案するモデルの妥当性と定量評価をおこない、モデルの検証と物理的意義を明らかにする。
- 4) 上記のモデルと視覚心理効果の実験成果を臨床神経科学的応用(健常者データの蓄積、及び認知症・うつ病患者との比較検討)へと発展させ実現を試みる。

4. 研究成果

4.1 移動する明度勾配図形の錯視

静止画像の錯視の中で、有名な錯視現象としてマッハバンドが挙げられる。このマッハバンドを引き起こす図形を動かした場合、濃度勾配と運動方向に関して非対称な明度錯視現象が観測される(図1)。図中左側の上下の図は濃度勾配が逆で静止している場合である。これらの図を右方向に動かした場合、非対称な明度錯視が観測される。右上の図は、明度勾配が負の方向に移動させた場合で、勾配部分が明るく知覚される。一方、右下の図は、明度勾配が正の方向に移動させた場合で、この時は勾配部分がより暗く知覚される。我々は、この知覚現象の脳内での情報処理に関する知見を得るために、以下の視覚心理実験を行った。

- 1) 運動が停止し、見えの明度が変化する遷移時間に注目。
- 2) 移動後に静止した見えの明度に安定するまでの時間分布を計測。

明度勾配が負の方向へ移動→勾配部分が明るく知覚



明度勾配が正の方向へ移動→勾配部分が暗く知覚



図1 単純な明度勾配図形が移動する場合に観測される非対称な明度錯視現象

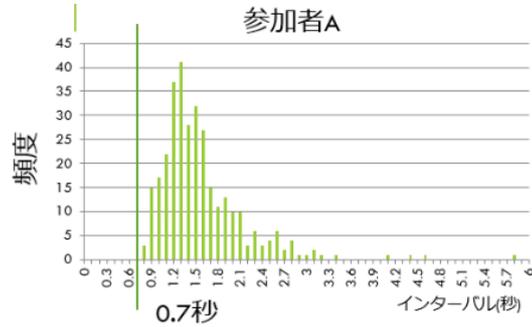


図2 明度勾配図形における明度錯視現象が安定状態に遷移するまでの時間分布

図2に結果の一例を示す。安定するまでの遷移時間には、明度変化時間+運動中明度持続時間+反応時間、の3要因が考えられる。反応の誤りなど、早過ぎる遷移時間データ(インターバル)は除去している。実験参加者により、遷移時間分布には大きな違い

$$G_{\alpha\beta}(t) = w \times \frac{\beta^\alpha t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)}$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

図3 ガンマ分布の定義式。ここで、 w 、 α 、 β は正の実定数である。

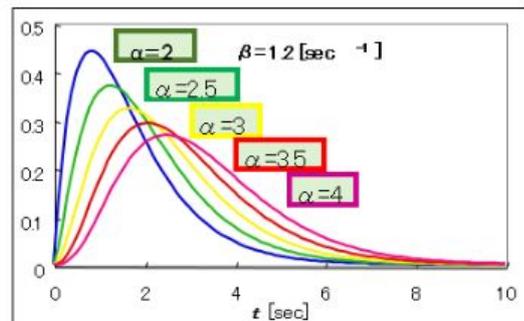


図4 ガンマ分布のパラメータ α を変化させたときのガンマ分布の形状変化

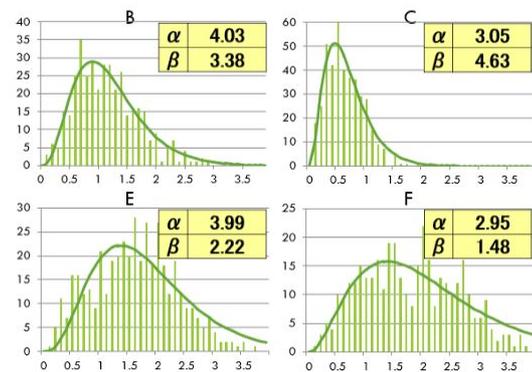


図5 4人の観測者の遷移時間分布にガンマ曲線をフィットさせた場合の α 、 β パラメータの変化。

が見られる。しかし、その分布形状はおおむねガンマ分布（図3参照）で近似する事が可能である。図4は実定数を変化させたときのガンマ分布の形状変化を示す。

図5は、観測データをガンマ分布で近似し Best Fit した場合の結果を示す。特徴的な点は、パラメータの値が整数値に近い事である。図5のデータ以外の結果からも、の値が自然数（ $n = 3, 4, 5, \dots$ ）に近いケースが多かった。この事から、移動中に強調された明度知覚の状態から、静止して安定な明度知覚に移行する時間における脳の振る舞いは、いくつかの量子的遷移状態が存在し、その間を確率で遷移するというモデルで説明できる可能性が示唆される。図6は、このモデルを示し、 $n = 4$ で、運動状態での見えの明度知覚から静止状態での見えの明度知覚への遷移が間に4段階ある事を示している。これらの結果は、個人が特定されると、 n 値及び τ 値とも、おおむね再現性は良かった。ただ、病的な状態（心理的・精神的）にある個人においては、 n の値はほぼ変わらず、遷移確率が大きく変動するという結果を予備的に確認している。今回の研究では、これらの結果を基に、臨床医学的な応用の可能性を追求する予定であった。しかし、統計的解析に耐えうる十分な観測データ数を得ることが前提となるため、より簡便な観測方法を求めている。試行錯誤が続き、学生を中心とする健常者のデータを蓄積するにとどまっている。今後、より簡便な観測方法を確立し、医師との議論を経て、実際の臨床応用実験を計画する予定である。

なお、視覚的意識の離散的確率過程に関しては、情報通信機構・村田勉氏の先行研究（多義図形の知覚交代時間の分布、2003年）がある。今回のガンマ分布での統計解析の結果は、村田氏の離散的確率過程説を裏付ける結果とも考えられる。

4.2 非線形モデルによる視覚の時間周波数特性の再現

運動中の物体映像や動画像には、二つの視覚効果が知られている。一つはモーション・ブラーであり、移動物体はぼやけて知覚され

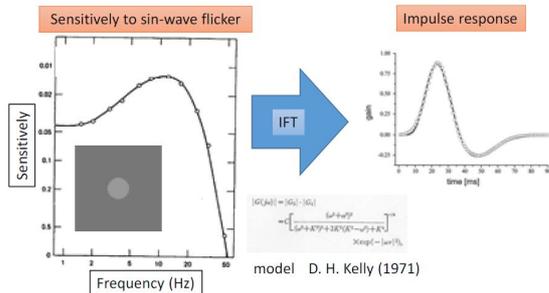


図6 フーリエ逆変換 (IFT) による視覚の時間周波数応答からインパルス応答の導出。

る事が多い。一方、運動を注視している場合に対象物体がより鮮明に知覚される場合がある。こちらは、モーション・シャープニング現象として知られているが、そのメカニズムは明らかにされていない。Pääkkönen と Morgan は、この二つの特性が視覚のインパルス応答により説明可能である事を示した（2001年）。一方、インパルス応答特性は、時間周波数特性をフーリエ変換する事で得られる事が知られている。図6に示すような、バンドパス・フィルタ的特性を視覚が持つ場合、図中右に示すように特徴的な視覚のインパルス応答が得られる。ただ、このインパルス応答特性は視覚に入る刺激の平均輝度に大きく左右され、暗い輝度領域でのローパス・フィルタ的な時間周波数応答から、明るい輝度領域でのバンドパス・フィルタ的な特性へと変化する（図7参照：D. H. Kelly, 1971）。図7の結果は、視覚のインパルス応答が外部の環境（平均刺激輝度レベル）に依り変化しており、単純な線形システムとしては理解できないことを示唆している。そこで、この非線形特性を再現できる数理モデルの提案を試みた。その第一歩として、視覚系が階層性のあるニューラル・ネットワークで構築されていることに配慮し、最も単純な非線形モデルとして下記の FitzHugh-Nagumo (以下 FHN と略す) 方程式を導入した。FHN 方程式は、

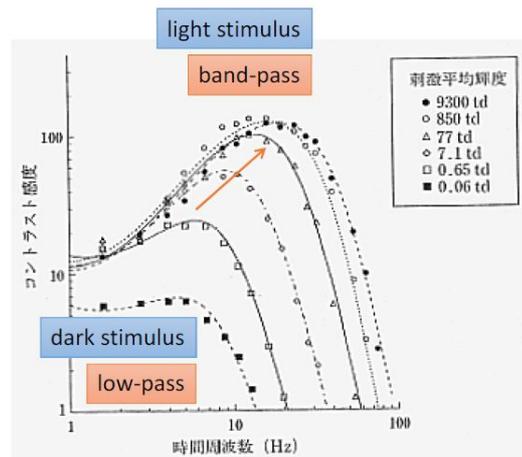


図7 視覚のインパルス応答の特徴

ニューロンにおけるスパイク発生モデル

$$\begin{aligned}
 u: \text{activator} & \quad \begin{cases} \frac{du}{dt} = C(u - u^3 - v) + I_{ext} \\ \frac{dv}{dt} = u - bv + a \end{cases} \\
 v: \text{inhibitor} &
 \end{aligned}$$

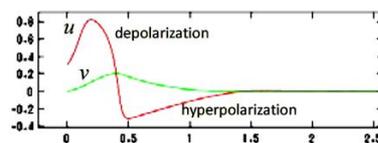


図8 神経細胞軸索を伝搬するインパルスの FitzHugh-Nagumo (FHN) モデル

ニューロンにおけるスパイクの発生モデルとして知られているが、視覚のマクロな時間周波数特性やインパルス応答を再現する非線形モデルの候補として導入し解析を試みている。

図 8 は、活性化因子 u と抑制因子 v を持つ 2 変数の FHN モデルである。ただし、外部からの視覚への入力刺激を示す I_{ext} を加えている。ここで、活性化因子 u の時間発展において、入力刺激の振幅が小さい場合の、固定点近傍での周波数応答特性を求めるため、FHN 方程式を u のみの一変数に変換する (図 9 参照)。ここで、 I は外部入力刺激を表し、式 (1) に示すように、平均輝度 I_0 の周りで正弦的に変動する微小入力である。 A は微小な固定値を示す。

$$I = I_0 + A \exp(i \omega t) \quad (1)$$

この入力に対する出力 u 、及びそのパワースペクトラム $P(\omega)$ は、微小入力に対する線形解析結果として、図 10 中の式に示すように記述できる。図 11 は、入力刺激強度レベルの変化によるパワースペクトルの変化を表し、低入力刺激 ($D < 0$) での low-pass 特性から、高入力刺激 ($D > 0$) での band-pass 特性に変化する。ここで、パラメータ D は式 (2) で定義され、入力刺激強度のレベルを示す。同様の結果は、数値シミュレーションによっても確認でき (図 12 参照)、小振幅動作時の特性を再現している。

$$D = b^2 - 2C + C^2(3u_0^2 - 1)^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = C(u - u^3 - v) \\ \frac{dv}{dt} = u - bv + a \end{cases} \quad \text{FHN 方程式}$$

one variable

$$\frac{d^2u}{dt^2} + C(3u^2 - 1 + b) \frac{du}{dt} + C(bu^3 + (1-b)u + a) = 0$$



$$\frac{d^2u}{dt^2} + C(3u^2 - 1 + b) \frac{du}{dt} + C(bu^3 + (1-b)u + a) = CI$$

図 9 FHN 方程式の一変数への変換

出力: $u = u_0 + \tilde{u}(\omega)e^{i\omega t}$, u_0 : 固定点

$$\tilde{u}(\omega) = \frac{AC}{-\omega^2 + i\omega(b + 3Cu_0^2 - C) + C[3bu_0^2 + (1-b)]}$$

パワースペクトル

$$P(\omega) \equiv \tilde{u}\tilde{u}^* = \frac{A^2C^2}{\omega^4 + [b^2 - 2C + C^2(3u_0^2 - 1)^2]\omega^2 + C^2[3bu_0^2 + (1-b)]^2}$$

図 10 微小入力変動に対する応答出力変動と、そのパワースペクトル $P(\omega)$

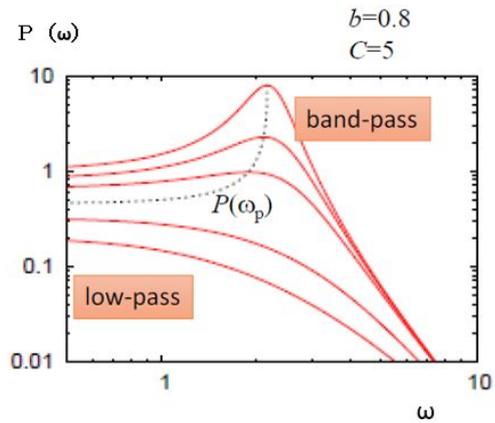


図 11 入力刺激強度レベルの変化による、パワースペクトルの変化。式 (2) に定義するパラメータ D により、スペクトル形状は low-pass より band-pass に変化する。

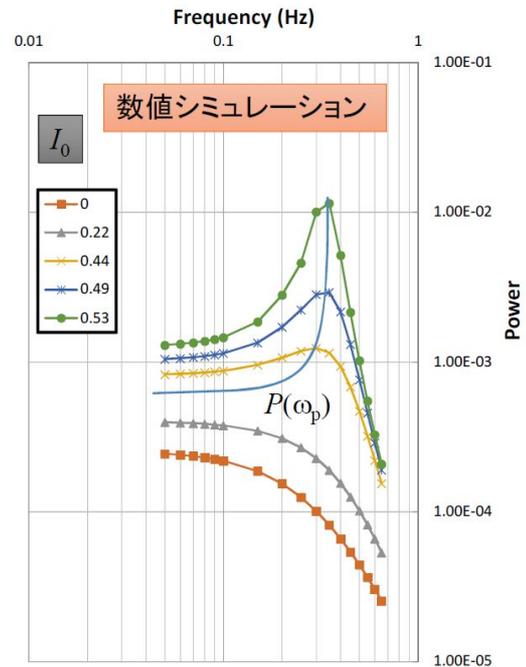


図 12 数値シミュレーションによるスペクトル特性の確認。解析結果と一致する。

一方、図 11 及び図 12 の結果 (小振幅特性) は、図 7 に示す、実際の視覚インパルス応答特性から期待されるパワースペクトルとは少し違った傾向を見せている。すなわち、両者の比較により、

高入力刺激領域で観測されるバンドパスのピーク周波数 $P(\omega_p)$ 変化は、実際の視覚特性とは異なり、モデル系では変化幅が小さい。

その原因として考えられるのは、入力刺激の交流分の振幅が小さいことや、システム内部のノイズの影響が考えられる。などの結果が得られ。この結果の意味するところは、議論の余地があるが、FHN モデルが入力レベルの変化によって、low-pass 特性か

ら band-pass 特性に変化する非線形特性を表現できるのは興味深い。今後、一つのマクロなニューロン・モデルではなく、拡散結合した FHN ニューラル・ネットワークの解析により、錯視など視覚の持つ情報処理メカニズムの理解につながることを期待している。

おわりに

研究成果の公開を兼ねて、「非線形科学と時間学の交流」に関する国際ミニワークショップを開催した(28年3月25日、26日)。参加者は、35名程度(外国人2名)で小さな会合ではあったが、北海道大学、千葉大学、京都大学、静岡大学、広島大学、明治大学、お茶の水女子大学等の非線形科学の研究者と視覚心理研究の研究者を一堂に会し、実りのある研究交流が可能となった。海外からはロシア・モスクワ大学のトリベルスキー教授(非線形数理)とドイツ・バイロイト大学のプラント教授に参加頂き、活発な質疑応答の時間を確保できた。ワークショップは、若手の研究者を中心に開催・発表され次世代の研究者が新たな研究領域に挑戦する契機となったと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

1. H. Miike, T. Sakurai, A. Nomura, S. C. Muller, Chemically Driven Convection in the Belousov-Zhabotinsky Reaction: -Evolutionary Pattern Dynamics-, FORMA, Vol.30 (2015), pp.S33-S53. 査読有
2. A. Nomura, Image Coding and Pooling with a Bio-inspired Reaction-Diffusion Algorithm, *Procedia Computer Science*, Vol. 71(2015), pp.125-130. 査読有
3. 川添祐治、長篤志、甲斐昌一、三池秀敏、マッハバンド錯視に対する動的視覚ノイズの影響、電子情報通信学会技術報告、HIP2014-86(2014), pp.35-39. 査読無
4. 磯部純司、長篤志、大高洗輝、甲斐昌一、三池秀敏、明度勾配に対する明るさ知覚の確率的遷移、電子情報通信学会技術報告、HIP2014-86(2014), pp.51-55. 査読無
5. A. Nomura, K. Okada, Y. Mizukami, M. Ichikawa, T. Sakurai, H. Miike, Recursive Edge Detection with Coupled Nonlinear Elements in a Coarse-to-Fine Approach, Recent Advances in System Theory, Signal Processing and Computation, ISCGAV '13(2013), pp.23-28. 査読有
6. A. Nomura, K. Okada, Y. Mizukami, H. Miike, M. Ichikawa, T. Sakurai, Subpixel Stereo Disparity for Surface Reconstruction by Utilizing a Three-Dimensional Reaction-Diffusion System, Proceedings of IVCNZ '12(2012), pp.144-149. 査読有

〔学会発表〕(計 19 件)

1. 三池秀敏、長篤志、大高洗輝、三浦幸一、錯視現象への非線形科学的アプローチ、自己組織化・錯視と数理の融合プロジェクト合同セミナー「反応拡散と錯視」(招待講演) 明治大学(東京都・杉並区)(2015/06/26) 他 18 件。

〔図書〕(計 1 件)

1. A. Nomura, K. Okada, Y. Mizukami, H. Miike, M. Ichikawa, T. Sakurai, Stereo Algorithm with Anisotropic Reaction-Diffusion System in "Current Advancements in Stereo Vision", INTECH(2012)pp.61-92(Chapter 4).

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 画像強調処理システムおよび電子内視鏡システム

発明者: 三池秀敏, 長篤志, 大高洗輝, 池本洋祐

権利者: HOYA 株式会社, 国立大学法人山口大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-108348

出願年月日: 2014 年 5 月 26 日

国内外の別: 国内

名称: 画像強調処理システムおよび電子内視鏡システム

発明者: 三池秀敏, 長篤志, 大高洗輝, 池本洋祐

権利者: HOYA 株式会社, 国立大学法人山口大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-108275

出願年月日: 2014 年 5 月 26 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

創発的脳機能としての視覚の非線形物理とその応用:

<http://npepva.eng.yamaguchi-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三池 秀敏 (MIIKE, Hidetoshi)

山口大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号: 1 0 1 0 7 7 3 2

(2) 研究分担者

長 篤志 (OSA, Atsushi)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 9 0 2 9 4 6 5 2

(3) 連携研究者

野村 厚志 (NOMURA, Atsushi)

山口大学・教育学部・教授

研究者番号: 4 0 2 6 4 9 7 3

甲斐 昌一 (KAI, Shoichi)

九州大学・名誉教授

研究者番号: 2 0 1 1 2 2 9 5