

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：15501
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26330276
研究課題名(和文) 拡散場環境で複雑に絡み合う一次元反応拡散系：長距離抑制効果の出現と視覚情報処理

研究課題名(英文) One-dimensional reaction-diffusion systems in diffusive environment: emergence of long-range inhibition and its application to visual information processing

研究代表者
野村 厚志 (Nomura, Atsushi)
山口大学・教育学部・教授

研究者番号：40264973
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、2次元又は3次元の格子上に配置されたFitzHugh-Nagumo型非線形反応素子の結合系を用いて、画像のノイズ除去・符号化・エッジ検出の視覚情報処理アルゴリズムを実現した。ここで、非線形反応素子は2変数で表される内部状態を持ち、その時間変化は微分方程式で記述される。また、格子上の隣接する素子は長距離抑制効果の下で結合されている。ノイズ除去は3次元格子を用いて、符号化は初期値にガウシアン・ノイズを加えることで、エッジ検出は外的刺激を導入することにより実現することができた。

研究成果の概要(英文)：This research work proposed algorithms of visual information processing: image noise reduction, intensity coding and edge detection. The algorithms utilize a system of coupled FitzHugh-Nagumo type nonlinear reaction elements. Each element has an internal state governed by two ordinary differential equations. The elements are placed on a two- or three-dimensional grid, and are coupled to their nearest neighboring elements under long range inhibition. By utilizing the grid, we successfully proposed the noise-reduction algorithm with a three-dimensional grid, the image intensity coding algorithm by introducing additive Gaussian noise into initial conditions, and the edge detection algorithm with external stimuli of image gradients.

研究分野：視覚情報処理

キーワード：反応拡散系 結合興奮系 FitzHugh-Nagumo 長距離抑制 視覚情報処理 ノイズ除去 画像符号化 エッジ検出

1. 研究開始当初の背景

我々は、非線形反応を示す素子を空間的・離散的に結合した結合興奮系を用いて、視覚情報処理の機能を実現してきた。実現した具体的機能として、エッジ検出やステレオ視差検出がある。これらを実現するにあたり、隣接する非線形反応素子の抑制的な結合（長距離抑制）が重要であることを見出した。

従来の我々の研究は、生物の神経軸索における情報伝搬の様子を記述する1次元非線形反応拡散系から着想を得たものである。ここで反応拡散系とは、反応素子が拡散によって結合されたものをいう。また、その振る舞いを記述する偏微分方程式を離散化すると、結合興奮系の方程式に類似のものが導かれる。

そこで研究開始当初は、多数の1次元反応拡散系が2次元中で複雑に絡み合った系を考え、これを2次元の結合興奮系とみなしたとき、どのような状況・条件で長距離抑制効果が出現するか、興味を持っていた。また、長距離抑制効果の下で、さらなる視覚情報処理の機能の実現にも興味を持っていた。

2. 研究の目的

当初の目的は、長距離抑制効果出現の状況・条件を明らかにすることであった。ここで、数理モデルとしてFitzHugh-Nagumo (FHN) 型の1次元反応拡散方程式を用い、複雑に絡み合って張り巡らされたネットワークにおいて、その効果が出現する状況・条件を調べ、その上で、FHNモデルを用いた結合興奮系の視覚情報処理への応用を検討する予定であった。

しかしながら、2年目の予期せぬ着想・発見により、長距離抑制効果を前提として、結合興奮系による視覚情報処理の機能を実現するアルゴリズムの検討を目的とした。

3. 研究の方法

(1) FitzHugh-Nagumo モデル

生物の神経軸索は興奮・抑制の内部状態を持ち、例えば外部からの刺激や内部の初期状態によって時間とともに変化する。この状態は2変数 (u, v) によって表され、状態の時間変化はFHNモデルにより次のように記述される。

$$\frac{du}{dt} = f(u, v) = \frac{1}{\epsilon} [u(u-a)(1-u) - v] \quad \text{式(1)}$$

$$\frac{dv}{dt} = g(u, v) = u - bv \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $f(u, v)$ と $g(u, v)$ は反応関数、 a, b, ϵ は定数である。FHNモデルは非線形反応を示すが、 a, b, ϵ の値により状態変化の様子が異なる。例えば、初期値をどのように置いたとしても、最終的にはある一つの状態のみに収束する場合があります。これを単安定系という。図1の場合、いかなる解 (u, v) も唯一の安定な抑制状態 $(u = 0, v = 0)$ に収束する。その過程において、図1(b)のように一度興奮状態となり $(u \approx 1)$ 、その後、抑制状態 $(v \approx 0)$ に変化する場合もあれば、図1(c)のように直接抑制状態となる場合もある。

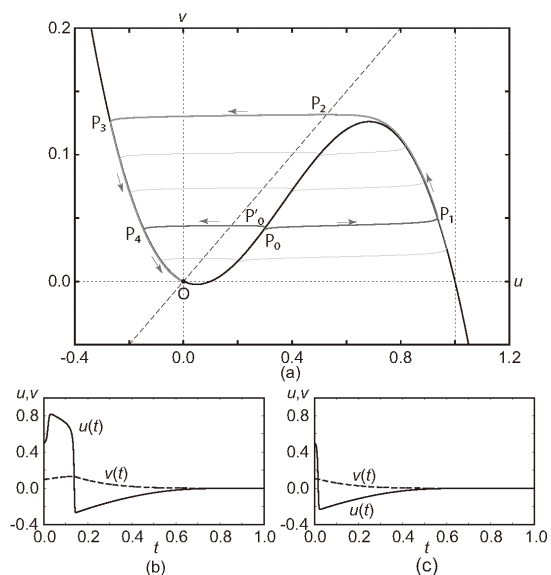


図1. FitzHugh-Nagumo モデルの単安定系における解 (u, v) の時間変化。モデルが単安定系で図(a)のような相平面(横軸 u , 縦軸 v)を持つとき、解 (u, v) の時間変化の2つの例を図(b)と図(c)に示した。ここで、初期条件が図(b) P_0 と図(c) P_0' で僅かに異なる。

(2) 結合興奮系

次に図2のように2次元状の格子を考え、格子点 (i, j) に素子を配置する。それぞれの素子の状態を2変数 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ で表し、その状態の時間変化をFHNモデルで記述する。但し、隣接する素子は変数 $u_{i,j}, v_{i,j}$ それぞれについて強度 C_u, C_v で次のように結合する。

$$\frac{du_{i,j}}{dt} = 4C_u [\bar{u}_{i,j} - u_{i,j}] + f(u_{i,j}, v_{i,j}) \quad \text{式(3)}$$

$$\frac{dv_{i,j}}{dt} = 4C_v [\bar{v}_{i,j} - v_{i,j}] + g(u_{i,j}, v_{i,j}) \quad \text{式(4)}$$

ここで、 $\bar{u}_{i,j}, \bar{v}_{i,j}$ は隣接する4素子の状態の平均を表す(図2の印で記された5つの素子のうち中央の素子を除いたものの平均)。FHNモデルに支配された素子は興奮・抑制のように状態変化をするので、このような系を結合興奮系と呼ぶ。

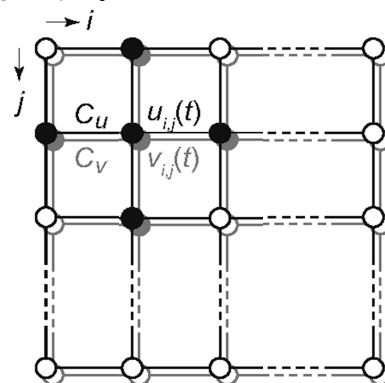


図2. 2次元格子状に配置されたFitzHugh-Nagumo型非線形反応素子の結合興奮系。格子の位置を (i, j) で表し、隣接する素子間の $u_{i,j}, v_{i,j}$ それぞれに関する結合強度を C_u, C_v で表す。

結合興奮系の状態の初期値分布に2次元画像を与えるとエッジ検出や領域分割が行えることや、式(3)に外的刺激の項を加え、これにステレオ画像の相関マップを与えると、視差検出が可能となることは既に知られている。

本研究課題では、このようなFHN型非線形反応素子の結合興奮系を用い、特に $C_u \ll C_v$ で表される長距離抑制性効果の下で、濃淡画像を対象としたノイズ除去、符号化(2値化)、エッジ検出のアルゴリズムの実現を行った。

4. 研究成果

(1) 画像のノイズ除去：学会発表

2次元画像に含まれるノイズを除去するアルゴリズムを、3次元の結合興奮系によって実現した。2次元のデジタル画像は2次元格子の各点において明るさが定義されている。ここで、明るさにランダムなノイズが加わっている場合、明るさの空間変化に比べて、ノイズの空間変化は急激である。従って、空間の2次元格子と明るさの1次元格子を組み合わせた3次元格子上で結合興奮系を考え、ノイズを含んだ画像の明るさ分布を外的刺激として与えることで、ノイズ除去アルゴリズムを実現した。

図3にこのアルゴリズムによるノイズ除去結果を示す。

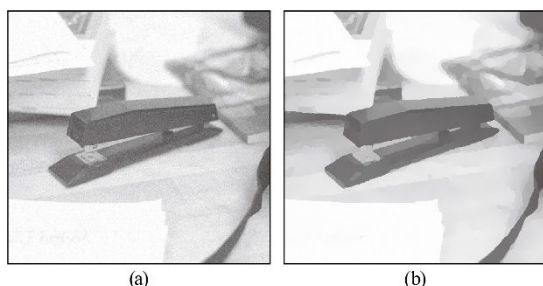


図3. 画像のノイズ除去アルゴリズムによる結果。図(a)：実画像(参考文献)にガウシアンノイズを加えたもの。図(b)：提案アルゴリズムによるノイズ除去の結果(学会発表のProceedings論文から図の一部を引用)。

(2) 画像の符号化・復号化：学会発表

ガウシアンノイズを加えた濃淡画像を、2次元格子に配置された結合興奮系の初期値として与える。そして、 $v_{i,j}$ のみの時間発展をある時間だけ計算し、その後 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ の時間発展を計算する。するとパルス分布が得られるが、そのパルス分布の密度は、およそ画像の濃淡分布となることを見出した。すなわち、濃淡画像を2値画像に変換したことになる(画像の符号化)。さらに興味深いことに、この2値画像を、再度結合興奮系の $u_{i,j}$ の初期値に与え、 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ の時間発展を計算すると、今度は、元画像の濃淡分布に類似のものが $v_{i,j}$ に得られることを見出した(画像の復号化)。なお、これらの符号化・復号化された2値画

像・濃淡画像は安定で、維持される(画像の蓄積)。

以上より、2次元の結合興奮系において、濃淡画像2値画像の相互変換が可能となっていることから、画像の符号化と蓄積が可能であることを見出した。

図4は2種類の実画像に対して、画像の符号化・復号化を行った結果の例を示す。



図4. 画像の符号化・復号化アルゴリズムによる結果。図(a)元の濃淡画像、図(b)2値化された画像、図(c)復号化された濃淡画像。(学会発表のProceedings論文から図の一部を引用)。

(3) 画像のエッジ検出：学会発表

2次元格子に配置されたFHNモデルの結合興奮系による濃淡画像のエッジ検出アルゴリズムをさらに発展させた。まず図5のように $(u_{i,j}, v_{i,j})$ の両方の初期値に濃淡画像を与える。そして、 $v_{i,j}$ のみ時間発展をある時間だけ計算する。その後 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ の時間発展を濃淡画像の勾配の絶対値分布を外的刺激として加えながら計算するアルゴリズムとした。すなわち、(2)の画像の符号化・復号化アルゴリズムとほぼ同様のアルゴリズムで、濃淡画像のエッジ検出も可能であることを見出した(ノイズを加えないところが主な違い)。

この提案したエッジ検出アルゴリズムと従来の代表的なCannyアルゴリズムとを、3種類のエッジ検出又は輪郭検出の画像データセット(USF: 参考文献, BSDS500: 参考文献, RuG: 参考文献)に適用し評価した。USFデータセットに適用した結果の例を図6に示す。エッジ検出結果を2つの評価方法: F-measure(正答率: 数値が大きいほど良い)とSD(正解との距離: 数値が小さいほど良い)に基づいて評価し、表1に示した。結果として、F-measureではCannyアルゴリズムの方が高く評価されたものの、SDでは提案アルゴリズムの方が高く評価された。

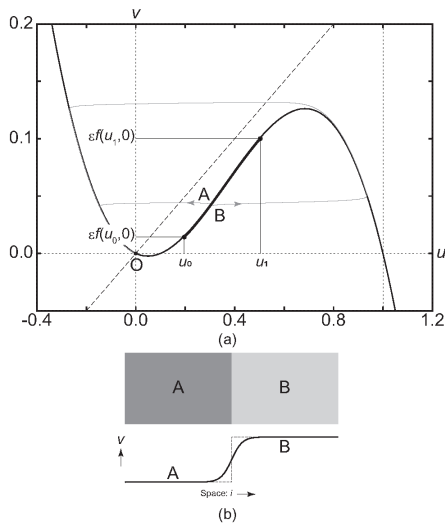


図 5. 画像のエッジ検出アルゴリズムにおける、 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ の初期値の設定方法。図(a)のように相平面の太線上に初期値を置く。例えば、図(b)の画像中の領域 A 及び B の濃淡は図(a)中の A 及び B 点に置かれる。

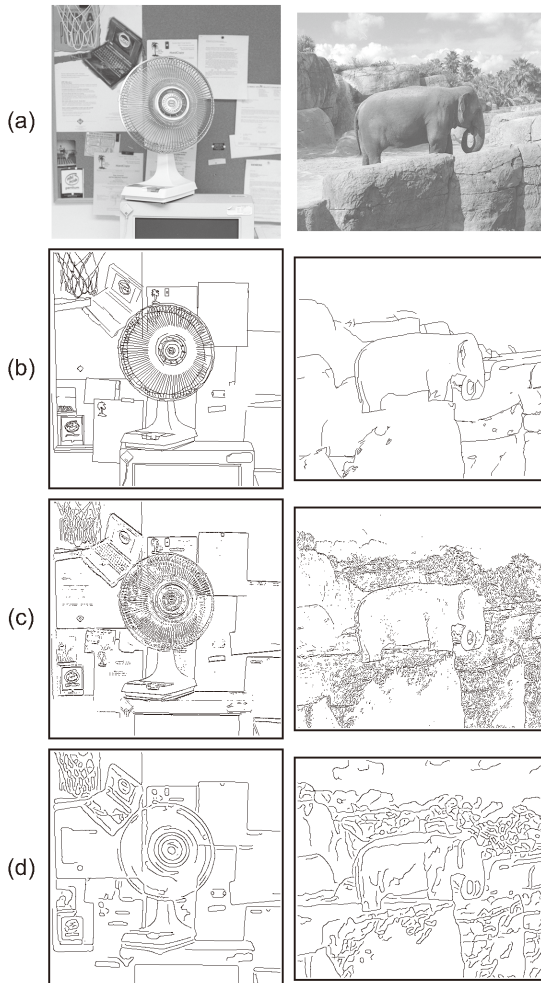


図 6. 画像のエッジ検出の提案アルゴリズムと従来アルゴリズム (Canny) との比較。図(a) : 実画像 (参考文献), 図(b) : 人間の目によるエッジ検出結果、図(c) : 提案アルゴリズムによるエッジ検出結果、図(d) : 従来アルゴリズムによるエッジ検出結果。

表 1 エッジ検出の提案アルゴリズムと Canny アルゴリズムの F-measure と SD による評価結果 (F の値は大きい方が良く、SD の値は小さい方が良い)。画像データセット : USF (aerial, objects) : 参考文献, BSDS500 : 参考文献, RuG : 参考文献 を利用。

| データセット | 提案 | Canny |
|--------------|------------------|------------------|
| USF(aerial) | F=0.65 SD=3.7 | F=0.67 SD=4.3 |
| USF(objects) | F=0.56 SD=7.7 | F=0.56 SD=8.2 |
| BSDS500 | F=0.54 | F=0.60 |
| RuG | F=0.37 SD=14 | F=0.38 SD=16 |

< 参考文献 >

- K. Bowyer, C. Kranenburg, and S. Dougherty, "Edge detector evaluation using empirical ROC curves", CVPR '99, Vol 1, pp 354-359, 1999.
(<http://figment.csee.usf.edu/edge/roc/>)
- P. Arbelaez, M. Maire, C. Fowlkes and J. Malik, "Contour detection and hierarchical image segmentation," IEEE Trans. on PAMI, Vol. 33, pp. 898-916, 2011.
(<https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/resources.html>)
- C. Grigorescu, N. Petkov and M.A. Westenberg, "Contour detection based on non-classical receptive field inhibition," IEEE Trans. on Image Processing, Vol. 12, pp.729-739, 2003.
(http://www.cs.rug.nl/~imaging/databases/contour_database/contour_database.html)

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 3 件)

- Atsushi Nomura, Koichi Okada, Yoshiki Mizukami, "Preprocessing in a reaction-diffusion algorithm designed for image edge detection," IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, December 12-14, 2016, Limassol (Cyprus)
- Atsushi Nomura, "Image coding and pooling with a bio-inspired reaction-diffusion algorithm," Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures, November 6-8, 2015, Lyon (France)
- Atsushi Nomura, Yoshiki Mizukami, Koichi Okada, "Image denoising algorithm with a three-dimensional

grid system of coupled nonlinear elements," The 11th International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications, August 28-30, 2014, Vienna (Austria)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 厚志 (NOMURA, Atsushi)
山口大学・教育学部・教授
研究者番号：40264973

(2) 研究分担者

岡田 耕一 (OKADA, Koichi)
山口大学・大学教育機構・講師
研究者番号：50452636

水上 嘉樹 (MIZUKAMI, Yoshiki)
山口大学・大学院創成科学研究科・准教授
研究者番号：60322252

(3) 連携研究者

一川 誠 (ICHIKAWA, Makoto)
千葉大学・文学部・教授
研究者番号：10294654

櫻井 建成 (SAKURAI, Tatsunari)
千葉大学・理学研究科・准教授
研究者番号：60353322