

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500278

研究課題名(和文) 明るさ知覚の反応拡散モデル：ハーマンガリッド錯視のチューリングシナリオ的理解

研究課題名(英文) Model of Brightness Perception: Understanding Hermann Grid Illusion with Turing Scenario

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) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、反応拡散方程式を用いた濃淡画像の2値化表現のための計算機アルゴリズムを提案した。Schnakenberg型の反応拡散方程式は周期的な空間パターン：Turingパターンを形成することが知られている。この方程式のあるパラメータを変化させることにより、周期パターンの空間波長が変化することを確認した。そこで、画像の明るさによってそのパラメータを変調することで、明・暗の分布からなる2値画像として表現するアルゴリズムとした。提案したアルゴリズムを複数の画像に対して適用し、得られた2値画像が人間の視覚において元の画像と同様に知覚されることを確認するとともに、そのアルゴリズムの収束を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research work we proposed an algorithm which converts a gray level image into a binary one. The algorithm utilizes a Schnakenberg type reaction-diffusion equation with activator and inhibitor distributions under a Turing condition; a periodic spatial pattern is self-organized in the reaction-diffusion equation under the Turing condition. We numerically confirmed that the spatial wave length of the self-organized periodic pattern depends on a parameter value of the equation. Thus, by modulating the parameter value with the gray level of an input image, we converted the image into a binary image. By applying the proposed algorithm to several real images, we confirmed that the algorithm successfully produces binary images which are perceptually equivalent to their input images. We also confirmed the convergence of the algorithm.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学/感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：反応拡散系 結合興奮系 視覚情報処理 Turingシナリオ 2値画像

## 1. 研究開始当初の背景

(1)人間の視覚情報処理系において、明るさ知覚における錯視現象が観測されている。例えば、ハーミングリッド錯視(Hermann, Pfl. Arc. Eur. J. Physiol., 1868)やマッハバンド効果(Mach, Akad. Wissensch., 1865)等が知られている。これらは明るさのコントラスト効果であり、明暗のコントラストの強い部分で観測される錯視現象である。一般にコントラスト効果は、側抑制(興奮性よりも抑制性の効果が強い)で説明される。この説は、カプトガニの側眼に着目した Hartline らの研究にさかのぼる。彼らは、生理学実験によりカプトガニの側眼でマッハバンド効果が知覚されていることを明らかにし、その離散的な数理モデル: Hartline-Ratliff 方程式を提案した(Hartline & Ratliff, J. Gen. Physiol., 1956)。その後、Barlow & Quarles は、Hartline-Ratliff 方程式に側抑制の効果を導入し、カプトガニの側眼におけるマッハバンド効果を極めて高い精度で再現した(J. Gen. Physiol., 1975)。これら一連の研究により、人間を含む生物の視覚系において、側抑制、すなわち、長距離抑制が明るさ知覚を理解する上で鍵となることが明らかとなった。

(2)生物の発生・形態形成の分野に目を向けると、Turing による反応拡散モデルに基づくヒドラのパターン形成を説明する数理モデルがある(Turing, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 1952)。Turing は、反応拡散モデルを用いて、興奮性に対して抑制性の拡散が強い場合に、生物に見られる周期パターンが形成されることを示した。さらに、Gierer & Meinhardt は、Turing のモデルを受け入れつつも、広く生物学者らにも受け入れられるよう、反応拡散モデルに外部刺激の項を付加したより現実的なモデルを提案した(Gierer & Meinhardt, Kybernetik, 1972)。実際に、外部刺激にわずかに空間勾配・分布がある場合において、生物(特にヒドラ)の局在化パターンを再現し、その数理モデルは広く受け入れられるようになった。ここでも、強い抑制性拡散が鍵となった。他の生物におけるパターン形成の例が、Geirer & Meinhardt の数理モデルを用いて説明されている(Sick et al., Science, 2006)。

(3)研究代表者、研究分担者及び連携研究者らは、これまで反応拡散モデルの1次近似である結合興奮系を用いて、エッジ検出や領域分割・群化(Nomura et al., J. Phys. Soc. Jpn., 2003)、ステレオ視差検出(Nomura et al., Mach. Vis. Appl., 2009)などの視覚機能を実現してきた。Turing の提案した周期パターンを生成する条件(Turing 条件)に類似の、強抑制性結合を課すことにより、それらの機能が発揮されることを見出した。

以上のような、過去の実験心理学、生理学、発生生物学の知見と、我々の結合興奮系を用いた画像処理及び計算機視覚の研究成果から、様々な視覚情報処理の機能を広く理解し実現するには、反応拡散系と Turing シナリオの考え方に基づく新しいアプローチが重要であると考えに至った。

## 2. 研究の目的

(1)本研究課題では、特に明るさ分布の2値表現法: Image Halftoning の反応拡散方程式によるアルゴリズムを提案する。Image Halftoning の手法としては、誤差拡散法やパターンディザ法などが従来より提案されており、さらに新しいアルゴリズムも提案されつつある(Lau & Arce, Modern Digital Halftoning, 2008)。それに対して、本研究では、生物への関心から反応拡散系と Turing のシナリオに基づく、生物のパターン形成機構に由来したアルゴリズムを構築することを目的とする。

(2)これまで本研究組織で提案してきた、結合非線形素子と抑制性結合を組み合わせた系による濃淡画像のエッジ検出やステレオ視差検出について、よりよい性質となるよう、さらなるアルゴリズムの修正を試みる。FitzHugh-Nagumo 型の結合興奮系によるエッジ検出は、2値画像に対して適用可能であって、濃淡画像に適用した場合、ある閾値で2値化された領域のエッジの検出となっていた。これを3値以上の明るさからなる濃淡画像のエッジ検出が可能となるようなアルゴリズムとする。ステレオ視差検出については、人間の奥行知覚において異方形が確認されており、そのモデル化・アルゴリズムの構築が課題であった。

## 3. 研究の方法

(1)Turing パターンを生じる代表的な数理モデルとして、Schnakenberg 型反応拡散方程式(Schnakenberg, J. Theor. Biol., 1979)を考える。この方程式は2つの変数:  $u, v$  を持ち、次の連立偏微分方程式で記述される。

$$\partial u / \partial t = \nabla^2 u + \gamma(a - u + u^2 v) \quad (1)$$

$$\partial v / \partial t = D \nabla^2 v + \gamma(b - u^2 v) \quad (2)$$

ここで、 $a, b$  はパラメータである。 $u, v$  の初期値は、例えばノイズ:  $n_1, n_2$  を用いて次のように設定する。

$$u(x, y, t = 0) = a + b + n_1 \quad (3)$$

$$v(x, y, t = 0) = b / (a + b)^2 + n_2 \quad (4)$$

また、境界にはノイマン条件を課す。式(1), (2)を数値的に解くため、有限差分法を用いる。

1次元及び2次元の領域において、Turing 条件:  $D = 20 \gg 1$  の下で Schnakenberg 型の反応拡散方程式の数値計算を行うと、初期状態が不安定化し、周期的な空間パターンが形成される。その例として、パラメータ  $b$  の値を3

通り： $b = 0.5, 1.0, 1.5$ に設定したときの結果を図1に示す。パラメータ $b$ を変化させることにより、反応拡散方程式の解： $u, v$ の周期パターンの波長が変化すること（ $b$ の増加とともに波長は短くなること）、 $u, v$ の相対的な大きさの関係が変化すること（ $b$ の増加とともに $u \geq v$ を満たす領域が大きくなること）が確認できる。

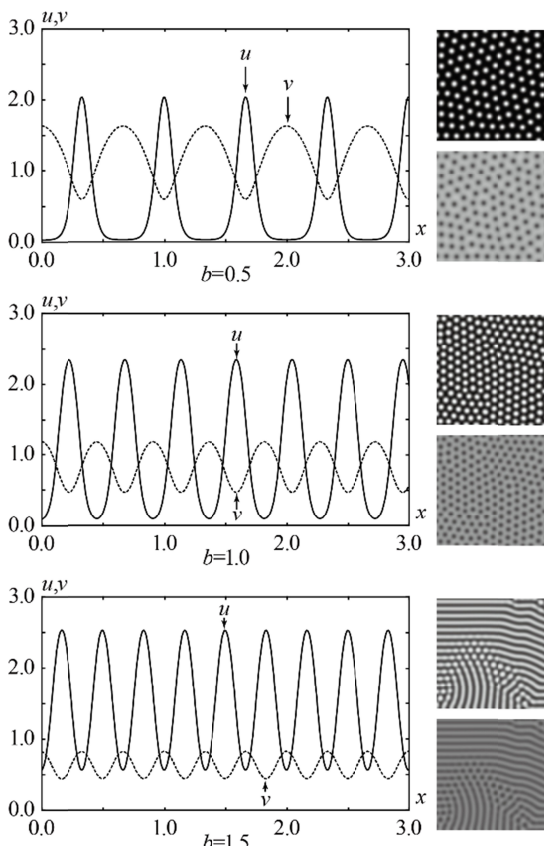


図1 Schnakenberg 型反応拡散方程式による Turing パターンの例。ここで用いたパラメータは、 $D = 20, a = 0.025, \gamma = 1000, \delta h = 1.0 \times 10^{-2}, \delta t = 1.0 \times 10^{-5}$ 。 $b$ の値は図中に示した。

(2) 図1の結果より、濃淡画像から2値画像を生成するには、パラメータ $b$ を正規化された濃淡画像 $I(x, y) \in [0, 1]$ によって次のように変調することを着想するに至った。

$$b(x, y) = b_{\min} + (b_{\max} - b_{\min})I(x, y)$$

ここで、 $b \in [b_{\min}, b_{\max}]$ である。 $u, v$ の大小関係によって、2値化画像 $H(x, y, t)$ は、次のように求める。

$$H(x, y, t) = \begin{cases} 1 & \text{if } u(x, y, t) \geq v(x, y, t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

なお、反応拡散方程式は時間発展型であり、時刻 $t$ における2値化画像を $H(x, y, t)$ とした。Turingパターンは、十分時間が経過するとほぼ定常状態となるので、その後の $H(x, y, t)$ を2値画像とする。

(3) 従来より提案してきた FitzHugh-Nagumo

型の結合興奮系によるエッジ検出については、活性化因子の抑制性因子に対する初期条件における時間遅れを設けることによって、濃淡画像からのエッジ検出に対応可能なアルゴリズムの着想に至った。また、奥行知覚における異方性については、FitzHugh-Nagumo 型の結合興奮系における結合強度に異方性を導入することによりモデル化・アルゴリズムの構築を試みた。

#### 4. 研究成果

(1) 提案した濃淡画像の2値化アルゴリズムについて、人工的に生成された濃淡画像及び評価用の実画像に対して適用した。このとき、パラメータは次のように固定した。

$$D = 20, a = 0.025, b_{\min} = 0.5, b_{\max} = 1.5, \\ \gamma = 1000, \delta h = 0.05, \delta t = 1.0 \times 10^{-5}$$

最初に、図2のように、一方向のみに濃淡分布を有する画像に対して、提案アルゴリズムを適用した。この結果から、明るい領域においては、周期パターンの平均的な明るさレベルが高く、暗い領域においては、その平均レベルが低くなり、予想した通りの結果が得られていることを確認した。

次に、図3のように複数の実画像に対して提案アルゴリズムを適用し、やはり人間の視覚系で確認しても良好な結果を得ることができた。但し、結果として得られる2値画像の定量的評価ができておらず、今後の課題である。

アルゴリズムの収束性を確認するため、 $\max|\partial u/\partial t|, \max|\partial v/\partial t|$ の指標を用いて時間変化を測定した。その結果、 $t = 10$ 付近でこれら2つの指標の時間変化が小さくなり、概ねアルゴリズムが収束することを確認した。

(2) エッジ検出アルゴリズムについては、これまで適用困難であった濃淡画像からのエッジ検出について、可能となることを確認した。但し、強いエッジ（明るさが急激に変化しているエッジ）の検出は良好であったが、弱いエッジ（明るさが緩やかに変化するエッジ）の検出は困難であり、課題として残った。さらにこの課題を解決するため、多重解像度画像を導入し、弛緩法の考え方を結合興奮系に導入することで、ソフトエッジを検出することも試みた。ソフトエッジ検出の問題を部分的には解決できたが、2重エッジという新たな課題（真のエッジの両側に偽のエッジが検出される）も浮かび上がった。

ステレオ視差検出において結合強度に異方性を導入したアルゴリズムについては、対象となるステレオ画像によっては、より精度良い視差検出が可能となることを確認した。人間の奥行知覚と比較するまでには至らなかった。

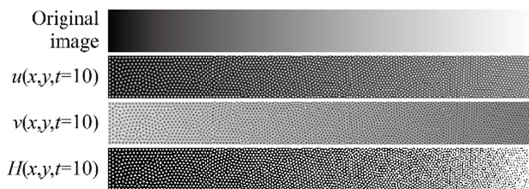


図 2 一方向のみに明るさ分布を有する単純な濃淡画像 $I(x, y)$ に対する、Schnakenberg 方程式の解： $u(x, y, t = 10)$ ,  $v(x, y, t = 10)$  とその 2 値化画像： $H(x, y, t = 10)$ 。



図 3 画像処理アルゴリズム評価用の実画像 (<http://marathon.csee.usf.edu/edge>) に対する提案アルゴリズムによる 2 値化結果。左：実画像  $I(x, y)$ 、右：2 値化画像  $H(x, y, t = 10)$ 。

## 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)

[学会発表](計 4 件)

Nomura, A., Recursive edge detection with coupled nonlinear elements in a coarse-to-fine approach, *The 13th International Conference on Signal Processing, Computational Geometry and Artificial Vision*, August 6-8, 2013, Valencia, Spain.

Nomura, A., Image halftoning with Turing patterns, *The 4th International Joint Conference on Computational Intelligence, International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications*, October 5-7, 2012, Barcelona, Spain.

Nomura, A., Image edge detection algorithm with a single grid system of coupled FitzHugh-Nagumo elements, *The 2012 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing*, March 4-6, 2012,

Honolulu, Hawaii, USA.

Nomura, A., Image edge detection with discretely spaced FitzHugh-Nagumo type excitable elements, *Joint INDS'11 & ISTET'11 - Third International Workshop on Nonlinear Dynamics and Synchronization and Sixteenth International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, July 25-27, 2011, Klagenfurt, Austria.

[図書](計 2 件)

Nomura, A., Mizukami, Y., Okada, K., Ichikawa, M.: Springer, Chapter 21: Image edge detection and orientation selection with coupled nonlinear excitable elements, *Selected Topics in Nonlinear Dynamics and Theoretical Electrical Engineering, Studies in Computational Intelligence, Vol. 459*, 2013, pp. 373-392. DOI: 10.1007/978-3-642-34560-9\_21

Nomura, A., Okada, K., Miike, H., Mizukami, Y., Ichikawa, M., Sakurai, T.: InTech, Chapter 4: Stereo algorithm with anisotropic reaction-diffusion systems, *Current Advancements in Stereo Vision*, 2012, pp. 61-92. DOI: 10.5772/46025

## 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・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：60322252

### (3) 連携研究者

三池 秀敏 (MIIKE, Hidetoshi)  
山口大学・大学研究推進機構・機構長  
研究者番号：10107732

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・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：60353322