

## 反応・拡散方程式による ランダムドットステレオ画像からの奥行き知覚モデル

野村厚志\*、一川誠\*\*、三池秀敏\*\*

\*山口県立大学国際文化学部、〒753-8502 山口市桜島 3-2-1

\*\*山口大学工学部感性デザイン工学科、〒755-8611 宇部市常盤台 2557

あらまし：本報告ではランダムドットステレオ画像からの奥行き知覚モデルを提案する。まず、ランダムドットステレオ画像を求めたい視差だけずらして重ね合わせ、各画素位置で2値からなる画素値に対して排他的論理和の演算を施す。その結果、ステレオ画像間に対応する領域とそうでない領域は、ゼロ一定の領域とランダムドットパターン領域とになって現れる。2種類のパターンからなる領域を分割し、設定した視差を持つ領域を抽出するために、生物の神経回路における電気信号の伝播の様子をモデル化した FitzHugh-Nagumo 型の反応・拡散方程式を用いる。最後に、各視差ごとに抽出された領域を統合することにより奥行き分布を得る。

キーワード：コンピュータビジョン、ランダムドットステレオ画像、奥行き知覚、反応・拡散方程式、FitzHugh-Nagumo モデル

## Depth Perception from Random-Dot Stereograms with a Reaction-Diffusion Model

Atsushi Nomura\*, Makoto Ichikawa\*\* and Hidetoshi Miike\*\*

\*Department of Cultural and International Studies, Yamaguchi Prefectural University  
Sakurabatake 3-2-1, Yamaguchi 753-8502, Japan

\*\*Department of Perceptual Sciences and Design Engineering, Yamaguchi University  
Tokiwada 2557, Ube 755-8611, Japan

Abstract: The present study proposes a model to depth perception from random-dot stereograms. The model calculates the exclusive-or logic operation for stereo images overlapping with each other with a disparity. Zero-flat regions obtained by the logic operation show matched regions with the disparity, on the other hand, random-dot pattern regions show unmatched regions. That is, the model converts the stereo correspondence problem to that of segmentation. To solve the segmentation problem, we introduce the reaction-diffusion model with the FitzHugh-Nagumo model simulating electrical pulse propagation along a biological nerve axon. The model integrates the extracted regions with each disparity and provides a depth map.

Keywords: computer vision, random-dot stereograms, depth perception, reaction-diffusion model, the FitzHugh-Nagumo model

## 1 はじめに

光軸が平行になるように配置した2台のカメラを用いて3次元シーンを撮影する。撮影の結果得られたステレオ画像において、3次元物体の横方向の位置は、カメラからの奥行き(距離)に応じて異なっている。この横方向の位置の違いを視差と呼び、視差と物体のカメラからの距離は逆比例の関係にある。従って、ステレオ画像から視差を求めれば、物体のカメラからの奥行きを求めることができる(両眼立体視)。人間の視覚システムは、両眼に映ったシーンに含まれる画像の視差情報から奥行きを知覚していると考えられている。従って、人間の視差情報の獲得のメカニズムを明らかにすることが、奥行き知覚のメカニズムを明らかにする上で必要である。Julesz [1]は、3次元シーン中の物体の表面がランダムドットパターンのみで覆われているステレオ画像に対しても、人間の視覚システムは奥行きを知覚可能なことを発見した(ランダムドットステレオグラム: 図1)。すなわち、画像はすべてランダムドットパターンで埋め尽くされており、どのような物体がどの位置に配置されているかわからないようになっている。従って、人間の視覚システムは高次の認識機能なしに視差情報のみから奥行きを知覚できることを示した。

本研究では、人間の視覚システムの理解を指向し、ランダムドットステレオ画像からの奥行き知覚モデルを提案する。提案モデルでは、まずステレオ画像を重ね合わせ、各画素位置において2値からなるドットパターンの画素値に関

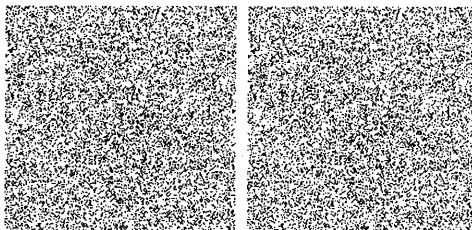


図1: ランダムドットステレオ画像の例

する排他的論理和 (XOR) の演算を施す。この演算によりステレオ画像間でドットパターンが一致する領域は、ゼロ一定の領域となり、一方、パターンが異なる領域ではドットパターンが残る。従って、パターンマッチングの問題が領域分割の問題に帰着する。この領域分割の問題を、生物の神経回路における信号の伝播の様子をモデル化した反応・拡散方程式を2次元に拡張したモデルによって解く。提案法を、簡単な奥行き分布を持つランダムドットステレオ画像に対して適用し、その有効性を確認する。

## 2 提案モデル

### 2.1 ステレオ対応問題から領域分割問題へ

提案法では、まずステレオ画像間のパターンマッチングの問題を、画素値に関する論理演算を用いて領域分割問題に帰着させる。すなわちランダムドットステレオ画像中で、視差  $D(\text{pixel})$  を持つ領域を抽出したいとする。このとき、図2のようにステレオ画像を、求めたい視差  $D$  だけ横方向にずらして重ね合わせる。(なお、エッジ拘束条件により、横方向のみにずらす。) 重ね合わせられた2枚の画像の各画素位置において、2値からなる画素値について排他的論理和 (XOR: 値が異なる場合のみ1、その他の場合はゼロとなる) の演算を施す。する

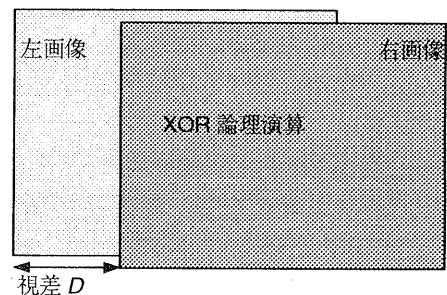


図2: ランダムドットステレオグラムに対する XOR 論理演算。求めたい視差  $D(\text{pixel})$  だけずらしてステレオ画像を重ね合わせ、各画素位置において2値からなる画素値に関する XOR 論理演算を施す。

と、ランダムドットパターンが一致した領域はゼロ一定となり、一致しない領域は、ランダムドットパターンが残ったままとなる。ゼロ一定となった領域は視差  $D$  を持つ領域であるので、ランダムドットパターンとゼロ一定の領域とを領域分割することは、視差  $D$  を持つ領域を抽出することになる。さらに、各視差  $D$  に対応する領域を求められれば、最後にそれらの結果を統合することにより、奥行き分布を推定することができる。

### 2.2 反応・拡散方程式

本モデルで領域分割のために用いる反応・拡散方程式について説明する。化学反応[2]や生物[3]において自己組織的に形成されるパターンのモデル式の一つとして、振動子が空間的に拡散で結びついた反応・拡散方程式が知られている。一般的な反応・拡散方程式は次式で記述される[2]。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= D_u \nabla^2 u + \frac{1}{\epsilon} f(u, v) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= D_v \nabla^2 v + g(u, v) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $u(x,t), v(x,t)$  は化学種の濃度を表す変数、 $D_u, D_v$  は  $u, v$  それぞれの拡散係数、また  $f(u, v), g(u, v)$  は化学的な反応を記述する関数である。

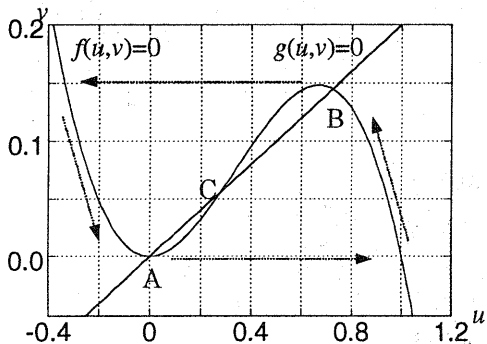


図 3：常微分方程式における FitzHugh-Nagumo モデルの解の振る舞いを表す相平面プロット。パラメータ  $a=0, b=5.0$  の場合、方程式は 2 つの安定な平衡解(A,B)を持つ双安定となる。

り、反応項と呼ばれる。 $u$  成分が拡散によってある一定値以上が周囲に伝播すると、反応項によって周囲の  $u$  の値も大きくなり(興奮状態)、また、 $v$  成分が拡散すると、周囲が興奮状態となるのを抑制する効果を持つ。これより、変数  $u, v$  はそれぞれ活性化因子・抑制因子と呼ばれる。

反応項は、現象に応じて異なるが、例えば生物の神経回路における信号の伝播の様子は、FitzHugh-Nagumo(FHN)モデルと呼ばれる次の関数で記述される[4,5]。

$$\begin{aligned} f(u, v) &= u(1-u)(u-a) - v \\ g(u, v) &= u - bv \end{aligned} \quad (2)$$

ここで  $a, b$  は定数である。式(1)において、拡散係数  $D_u, D_v$  をゼロとした常微分方程式系において、反応項を FHN モデルとした場合の解  $(u(t), v(t))$  の振る舞いを図 3 に示す。図 3 のよう

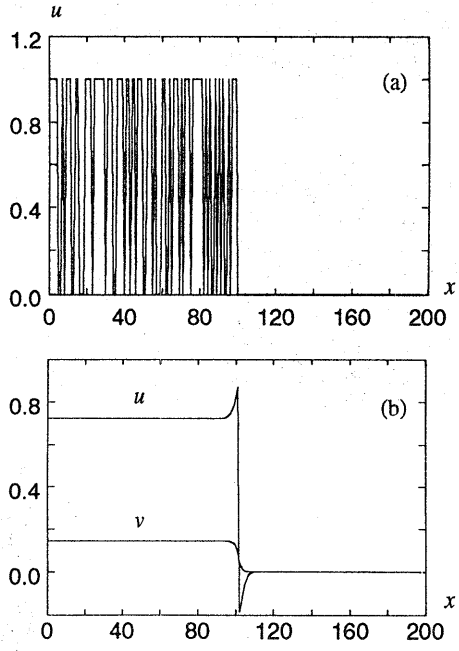


図 4：1次元における領域分割結果。(a)  $u$  成分の初期条件 ( $v$  の初期条件はゼロ一定)、(b) FHN 型の反応・拡散方程式による計算結果( $t=1.0$  における  $u, v$  の分布)。

に、パラメータ( $a, b$ )の値によって、解が2つの安定な平衡点に収束する場合がある (双安定)。

### 2.3 1次元での領域分割

FHN 型の反応・拡散方程式を用いて領域分割問題を解く。簡単のため、図 4(a)のような1

次元領域で、ランダムドットパターン領域とゼロ一定領域の分割問題を考える。この1次元の分布を FHN 型の反応・拡散方程式の  $u$  成分の初期値とする。一方、 $v$  成分の初期値として、ゼロ一定値を与える。また反応・拡散方程式のパラメータは  $D_u=5, D_v=20, a=0, b=5, \epsilon=1.0 \times 10^{-3}$

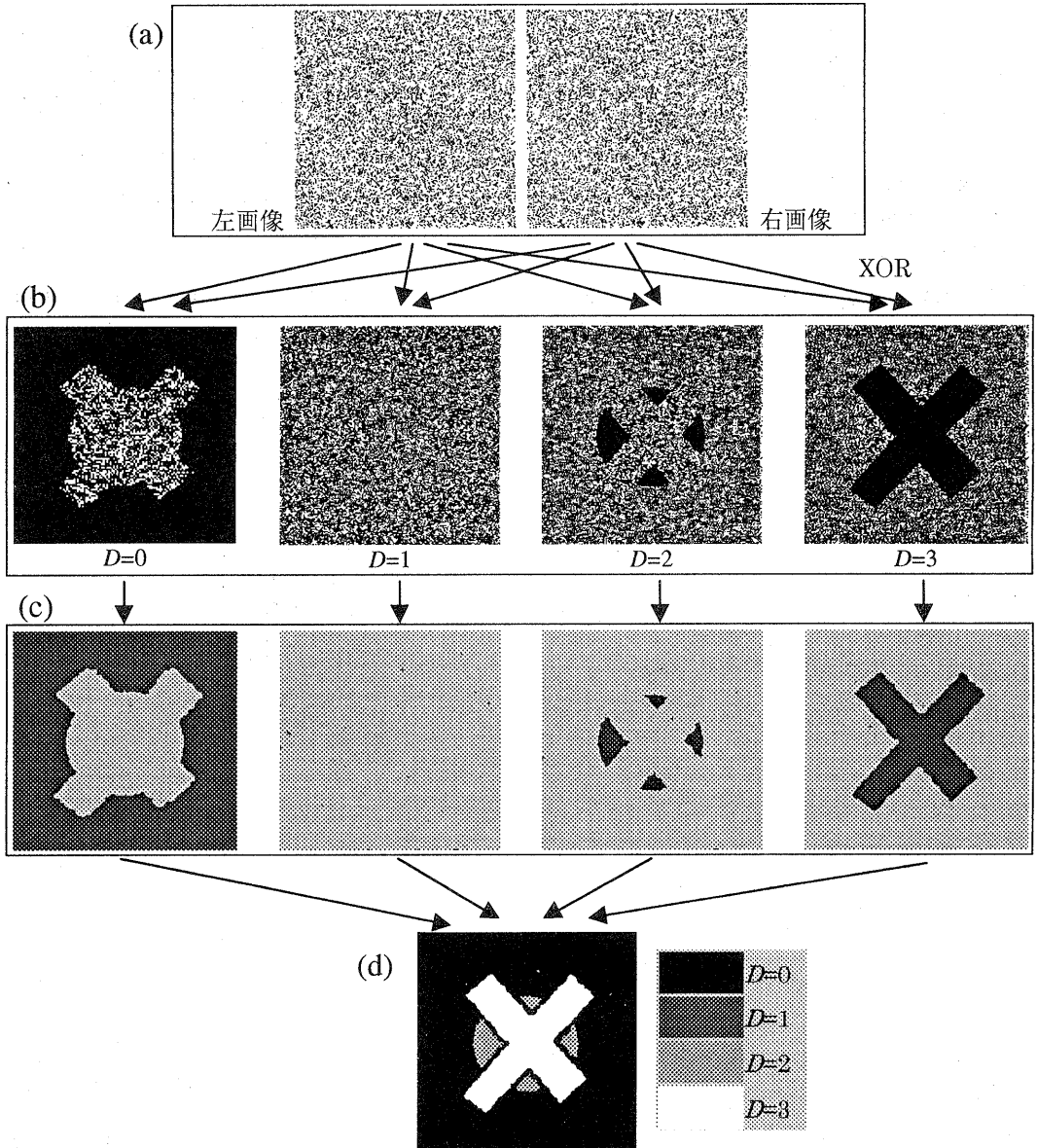


図 5: ランダムドットステレオ画像からの奥行き推定。(a)ランダムドットステレオグラム、(b)XOR 演算結果、(c)FHN 型反応・拡散モデルによる計算割結果( $t=1.0$ )、(d)推定された奥行き分布図。

と設定する。これらのパラメータの下で FHN 型の双安定反応・拡散方程式に従って  $u, v$  の時間変化を計算する（但し、境界条件：ノイマンゼロ条件、空間刻み：1、時間刻み： $1/10^4$  とした）。ランダムドットパターンの領域では  $u$  成分の拡散の効果によって平均化された後、反応項によってその領域全体が一様に安定な平衡点（図3の点B）に収束し、ゼロ一定の領域では、解はもう一方の安定な平衡点（図3の点A）に収束するので、 $t=1.0$  において図4(b)のような空間分布が得られる。なお、 $D_u \ll D_v$  の条件によって抑制因子の拡散が活性化因子のそれよりも大きいため[3,6]、2つの領域の境界はほぼ静止する。以上の結果から、適当な数居値（例えば、図3の点A,Bの中点の  $u$  の値）で2値化すると、ランダムドットパターンからなる領域とゼロ一定の領域とを分割することができる。

#### 2.4 2次元での領域分割と奥行き分布の推定

2次元の場合においても、FHN型の反応・拡散方程式を用いてランダムドットパターン領域とゼロ一定領域を分割可能なことを示す。さらにその結果を基に、ランダムドットステレオ画像からの奥行き分布の推定例を示す。

図1のランダムドットステレオグラムを視差  $D=0,1,2,3$  と順に変化させながら、2-1.で述べた XOR 論理演算を行う。その結果、図5(b)のように視差  $D=0,1,2,3$  を持つ領域とそれ以外の領域がゼロ一定領域とランダムドットパターン領域とになる。各視差  $D$  において XOR 論理演算の結果得られた2次元分布を、2次元の反応・拡散方程式(1),式(2)の  $u$  成分の初期値として与える。一方の  $v$  成分の初期値は、ゼロ一定とする。方程式のパラメータは1次元の場合と同様に  $D_u=5, D_v=20, a=0, b=5, \epsilon=1.0 \times 10^3$  と設定する。時間変化を計算し（図5(c)）、適当な数居値（ここでは図3の点A,Bの中点の値： $u_0=0.3$  とした）で2値化を行い、抽出された領域を視差に応じて順に重ねあわせることにより、奥行き分布を推定した（図5(d)）。得られた結果の正当

性を確認するため、提案モデルによって推定した奥行き分布と設定した正しい奥行き分布の  $y=100$  における1次元断面を図6に、また奥行き分布の3次元表示を図7にそれぞれ示す。全体的に正しく奥行きが推定されているが、奥行きが大きく変化する部分では、推定されず未知となっている。反応・拡散方程式によって領域分割を行う際に、ゼロ一定領域とランダムドット領域との間の境界が反応・拡散方程式によって数画素ほど移動したためだと考えられる。

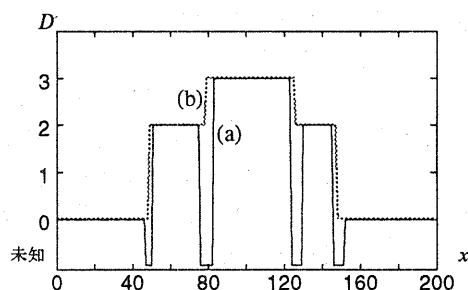


図6：提案モデルによって推定された奥行き分布の  $y=100$  における1次元断面。(a)推定値、(b)設定値。

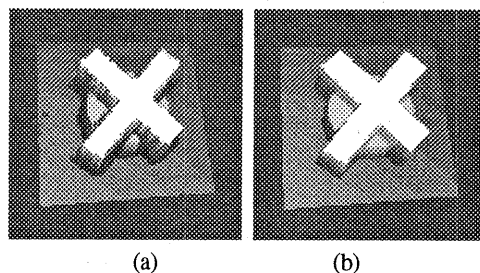


図7：提案モデルによって推定された奥行き分布(a)と真の奥行き分布(b)の3次元表示。

### 3 まとめ

本研究では、ランダムドットステレオ画像からの反応・拡散方程式に基づく奥行き分布推定モデルを提案した。すなわち、ランダムドットステレオ画像を求めたい視差だけずらして重ねあわせ、各画素位置で排他的論理和の演算を施す。演算の結果、その視差を持つ領域はゼロ一定となり、その他の領域はランダムドットパターンのままとなる。この分布をFHN型の反応・

拡散方程式の活性化因子の初期条件に設定し、時間発展を計算することにより、領域分割が自己組織的に行われる。結果として設定した視差を持つ領域を抽出することができる。各視差についてこの操作を並列的に実行し、領域分割の結果を統合することにより、奥行き分布を推定した。

今後の課題としては、曲面状の奥行き分布を持つランダムドットステレオ画像や、現実のランダムドットステレオ画像に対して本モデルを適用し、その有効性を確認することが必要である。また、他のランダムドットステレオからの奥行き推定モデル・手法[7,8]と提案モデルとの違いを明らかにする必要がある。さらに、今後、提案モデルを人間の視覚システムにおける奥行き知覚モデルとして発展させる場合、既に確認されている人間の視覚の奥行き知覚におけるコントラスト錯視現象[9,10]をも再現可能かどうか確認する必要がある。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)・課題番号：11780291）による。

#### 参考文献：

- [1] B. Julesz, Binocular Depth Perception of computer-generated patterns, *The Bell System Technical Journal*, **39** (1960), 1125-1162.
- [2] J. P. Keener and J. J. Tyson, Spiral waves in the Belousov-Zhabotinskii reaction, *Physica*, **21D** (1986), 307-324.
- [3] S. Kondo and R. Asai, A reaction-diffusion wave on the skin of the marine angelfish *Pomacanthus*, *Nature*, **376** (1995), 765-768.
- [4] R. FitzHugh, Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane, *Biophysical Journal*, **1** (1961), 445-466.
- [5] J. Nagumo, S. Arimoto and S. Yoshizawa, An active pulse transmission line simulating nerve axon, *Proceedings of the IRE*, **50** (1962), 2061-2070.
- [6] A. M. Turing, The chemical basis of morphogenesis, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Science*, **237** (1952), 37-72.
- [7] D. Marr, *Vision*, W.H.Freeman and Company, (1982).
- [8] P. Dev, Perception of depth surfaces in random-dot stereograms: A neural model, *International Journal of Man-Machine Studies*, **7** (1975), 511-528.
- [9] S. M. Anstis, L. P. Howard and B. Rogers, A Craik-O'Brien-Cornsweet illusion for visual depth," *Vision Research*, **18** (1978), 213-217.
- [10] A. Brookes and K. A. Stevens, The analogy between stereo depth and brightness," *Perception*, **18** (1989), 601-614.