

興奮性信号の空間的伝搬遅延を用いた任意方向動体 検出イメージセンサアーキテクチャ

著者	秋田 純一, 高安 美佐子, 高安 秀樹, 小泉 周
雑誌名	電子情報通信学会論文誌 Cエレクトロニクス
巻	86
号	8
ページ	863-868
発行年	2003-08-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/3004

論文

興奮性信号の空間的伝搬遅延を用いた任意方向動体検出

イメージセンサアーキテクチャ

秋田 純^{†a)} 高安美佐子[†] 高安 秀樹^{††} 小泉 周^{†††}Image Sensor Architecture for Arbitrarily Directional Motion Detection
Using Spacial Propagation Delay of Excitement SignalJunichi AKITA^{†a)}, Misako TAKAYASU[†], Hideki TAKAYASU^{††},
and Amane KOIZUMI^{†††}

あらまし イメージセンサ上に情報処理機能の一部を取り込む Vision Chip が広く研究されているが、ロボットビジョンなどで必要な画像の「意味」を抽出しようとするものはほとんどない。本論文では、画像の「意味」を出力とするイメージセンサとして、画像中の動く輝点の速度と方向を出力とするイメージセンサのための新規アーキテクチャの提案とその基礎的な検討を行う。この輝点の方向検出の際に、画素を格子状に並べる通常の構成で問題となる方向の特異性を解消し、任意方向の検出が可能となるアーキテクチャの提案とその基礎的な検討を行う。

キーワード Vision Chip, 動き検出, 興奮性信号, 任意方向検出, 無作為配置

1. まえがき

通常の画像処理システムでは、CCD カメラなどのビデオカメラと PC などのコンピュータからなるシステムを用いるのが一般的である。この構成では、ソフトウェア処理を用いるために柔軟性に富むが、特に画素数が多い場合や高度な処理を行う場合にカメラとコンピュータの間、あるいはコンピュータ内のメモリとプロセッサの間のデータ転送が全体の処理速度を制限する要因となることが多い。これらの制限要因を除くために各種高速化アルゴリズムや並列アーキテクチャによる信号処理系に関する研究が盛んであるが [1]~[3]、根本的に画像を構成する画素の一つひとつに対して順次処理を行う逐次処理方式であるため、劇的な高速化・

高機能化は望みにくい。

これに対し、集積回路技術の進歩により、一部の情報処理機能をイメージセンサに取り込む、いわゆる Vision Chip が広く研究されている [4], [5]。しかし多くの Vision Chip に関する研究では、ノイズ除去やエッジ検出、モーメント計算などの比較的単純な処理を対象とするものであり、またその処理結果の出力も、処理後の映像のままであるものも多い。しかしロボットビジョンなどへの応用を考えると、最終的に必要となるのは画像の「意味」であり、それを抽出するためには再びコンピュータによる画像処理によることになる。一方で汎用プロセッサを画素ごとにもたせ、近隣画素との演算を対象とするソフトウェア志向の Vision Chip [6] も提案されている。

本論文では、画像の「意味」を出力とするイメージセンサの実現を目的とし、画像の意味理解の極めて初期段階の情報処理の一つとして、画像中の動く輝点の速度と方向を検出し、それを出力とするイメージセンサのためのアルゴリズムとそのアーキテクチャの提案、及び基礎的な検討を行う。

これまでにも方向検出を行う Vision Chip に関する研究は多くある [7]~[13] が、そのアルゴリズムは大

† 公立はこだて未来大学システム情報科学部, 函館市
Future University—Hakodate, 116-2 Kamedanakano, Hakodate-shi, 041-8655 Japan

†† ソニーコンピュータサイエンス研究所, 東京都
Sony Computer Science Laboratories, Inc., 3-14-13 Higashi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo, 141-0022 Japan

††† 慶応大学医学部生理学教室, 東京都
Keio University, 35 Shinanomachi, Shinjuku-ku, Tokyo, 160-8582 Japan

a) E-mail: akita@fun.ac.jp

大きく2種類に分類することができる。一つはEular-Lagrange方程式をアナログ回路網で求めるものであり[7]~[9]、もう一つは生体の網膜での信号伝搬モデルをアナログ回路で模擬するものである[10]~[13]。本論文では、後者の網膜のモデルを模擬する方針をとるが、興奮性信号のみを用いる新しい方向検出モデルを用いることにする。

この輝点の方向検出の際に、画素を格子状に並べる。通常の構成では水平や垂直などの特定方向のみ検出しやすい、といった方向の特異性が問題となる場合があるが、それを解消し、任意方向の検出が可能となる新規アーキテクチャの提案とその基礎的な検討を行う。

2. 興奮性信号の空間的伝搬遅延を用いた動体検出アルゴリズム

生体の網膜中には、受光素子にあたる錐体や桿体^{かん}という受光細胞以外にも、水平細胞・ガングリオン細胞といった細胞が存在し、相互にネットワークを作っていることが知られている。このネットワークによって、網膜が単なる撮像素子だけではなく、初期的な視覚情報処理を行う機能をもつことが知られている[14]。

この網膜がもつ情報処理の一つに、網膜上に動く輝点の動きの方向と速度を検出する機能がある。方向選択性と呼ばれているこの機能のメカニズムはいまだに未解決の問題で、神経のもつ興奮性信号と抑制性信号のうち、従来は抑制信号が重要な役割を担っていると思われてきた[15],[16]が、最近、カメラなどの一部の動物の網膜中では、抑制性信号が発生せずに、興奮性信号のみが発生していることが知られている[17]。

高安らは、興奮性信号のみでも方向選択性が実現可能であることを、次に示すような単純化したモデルと神経細胞の電気生理的特性を記述する数値シミュレータ NEURON を利用して明らかにしている[18]。これは、図1のように空間的に離れた、光が当たると幅 T の興奮性信号を発生する二つの受光素子 PR1, PR2 を仮定するものである。ここで動く輝点 P が両者に順に当たるのに要する時間を Δt_m とする。すなわち両者の空間的な距離を L 、動く輝点 P の速度を v とすれば $\Delta t_m = L/v$ である。また PR1 で発生した興奮性信号が、遅延を経て C まで到達するのに要する時間、すなわちここで生成する遅延時間を Δt_p とする。そして両者をつなぐ細胞 C は、同時に興奮性信号が到達した場合のみ、出力 Q を興奮させるとする。この出力 Q には、以下の条件を満たすときに興奮性信号が発生すること

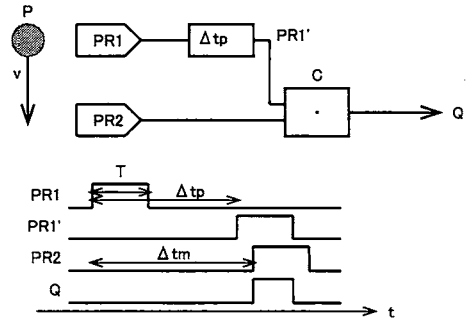


図1 興奮性信号のみによる動き検出機構

Fig. 1 Motion detection mechanism using excitement signal.

になる。

$$|\Delta t_m - \Delta t_p| < T \quad (1)$$

逆に出力 Q に興奮性信号が発生した場合には、 $\Delta t_m \sim \Delta t_p$ と近似すると、この Q に接続している受光素子 PR1 から PR2 へ向かう方向に輝点の動きがあったことになり、その輝点の速度 v が $v = L/\Delta t_p$ 程度であることになる。この L と Δt_p は二つの受光素子 PR1 と PR2 の空間的な配置と遅延要素によってのみ決まるため、Q のみを見ることで、それに対応する方向と速度の輝点の動きがあったことを知ることができることになる。

3. 興奮性信号の空間的伝搬遅延を用いた動体検出イメージセンサ

以上の興奮性信号のみを用いる動き検出アルゴリズムを用いて、動体検出機能をもつイメージセンサを構成することを考える。以下に各構成回路要素について述べる。

3.1 受光部

受光部の回路構成を図2に示す。受光部は、光を受けて電流を生成するホトダイオードと、その光電流によって発生する電圧によって容量 C を放電するトランジスタからなる。この回路により、輝点がこの受光部を通過した場合にのみ、 $T \sim 1\mu\text{s}$ 幅程度の一定時間幅のパルスが発生する。なお C は 1pF 程度の容量、 V_{PC} はそのプリチャージ信号である。またホトダイオードの負荷トランジスタのバイアス電圧 V_{b1} はホトダイオードの光電流によって調節する必要がある。

3.2 遅延発生回路

動く輝点^{かん}が、空間的に離れた別の受光部を通過するまでに要する時間と同程度のパルスの遅延時間を生成

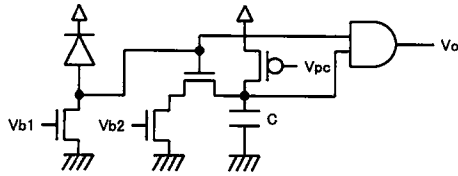


図2 受光部の回路構成
Fig. 2 Circuit of photo receptor and pulse generator.

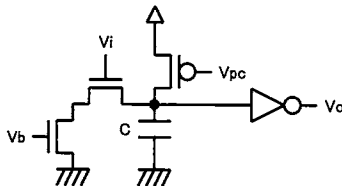


図3 遅延発生回路の回路構成
Fig. 3 Circuit of delay generator.

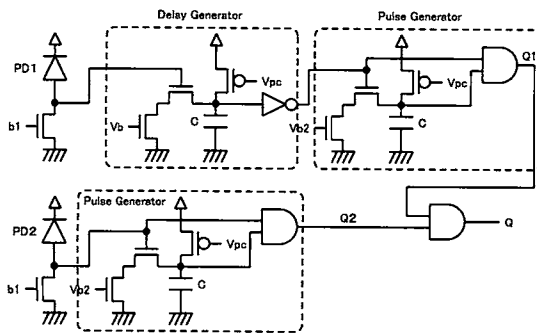


図4 全体の構成
Fig. 4 Circuit diagram of one pair of motion detectors.

するための遅延発生回路を図3に示す。輝点の動く速度から1ms程度の遅延時間が必要である。ここで容量Cを1pF程度とし、その放電に要する時間を用いてこの遅延時間を発生するとすると $10^9\Omega$ 程度の抵抗が必要となるため、これにはMOSトランジスタのサブスレッショルド領域を利用する。この遅延時間発生回路の出力を、図2の受光部の右半分にあるパルス発生回路に与えることで、1ms程度の遅延 Δt_p をもった $T = 1\mu s$ 程度の幅のパルスを発生させることができる。

3.3 パルス到達検出部

前述の遅延発生回路を経て遅延したパルスと、空間的に離れた受光部を動く輝点が通過することで時間的に遅れて発生したパルスが同時に到達する場合に、この遅延時間と空間的距離との関連が求められるのが、本イメージセンサのアーキテクチャの要点である。こ

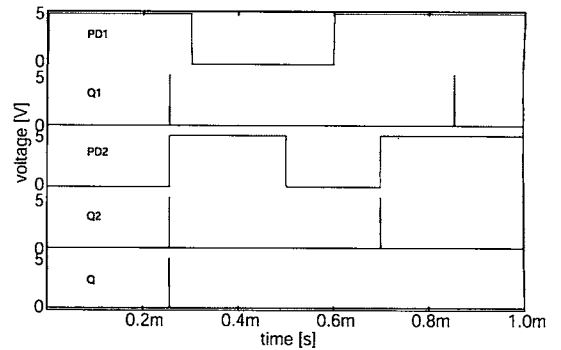


図5 回路シミュレーション結果
Fig. 5 Simulation results.

のパルスの同時発生の検出は、パルスの形状を考慮する必要はなく、パルスの同時発生のみを検出するだけでよい。単に一つのANDゲートを用いればよい。

3.4 全体の構成と評価

以上の各要素を用いた、興奮性信号の空間的伝搬遅延を用いた動き検出イメージセンサの構成を、1対の受光回路ペアに関して図4に示す。

この回路に対し、輝点の動きによるホットダイオードPD1, PD2の露光の遅延を $250\mu s$ 及び $100\mu s$ の2通りとし、遅延発生回路による遅延時間を $250\mu s$ となるように $V_{b1}=0.53V$, $V_{b2}=0.8V$ とした条件でHSpiceを用いて回路シミュレーションを行った。なおトランジスタのモデルはVDEC CMOS $0.6\mu m$ プロセスのトランジスタモデルを用いた。またこの条件での受光部が発するパルス幅Tはおおよそ $1\mu s$ であり、また遅延発生部の遅延 Δt_p はおおよそ $250\mu s$ である。ここで露光時の光電流は $0.1\mu A$ を仮定し、この光電流が流れるときに電源電圧3Vと同程度の出力電圧が得られるように、バイアス電圧は $V_{b1}=0.4V$ とした。また図5中のPD1, PD2はともにホットダイオードと負荷トランジスタの接続ノードの電圧である。

なお図2のパルス発生回路と図3の遅延発生回路は、MOSトランジスタのサブスレッショルド領域を用いているため、ゲート電圧やデバイスパラメータの変動に対して特性が大きく変わる。例えばパルス発生回路では $V_{b2}=0.77V$ ではパルス幅は $1.8\mu s$, $V_{b2}=0.83V$ ではパルス幅は $0.9\mu s$ となり、また遅延発生回路では $V_b=0.50V$ では $\Delta t_p=600\mu s$, $V_b=0.56V$ では $\Delta t_p=120\mu s$ となる。本アーキテクチャでは、パルス幅や遅延発生回路による遅延時間が検出される動きに深く関係するため、クロック同期式のデジタル

回路などの、電圧・デバイスパラメータの変動に対して安定な回路構成をとる方が妥当であると考えられるが、本論文では、アーキテクチャ自身の基礎検討のためにアナログ回路での検討のみを行った。

以上の条件でのシミュレーション結果を図5に示す。

$t = 0$ で輝点が受光部PD1に達し、そこから $250 \mu\text{s}$ 後に幅約 $1 \mu\text{s}$ のパルスがQ1が発生している。その輝点がちょうど $250 \mu\text{s}$ 後に受光部PD2に達し、同時にパルスがQ2が発生したことで、Q1とQ2のANDである出力Qが1となっている。このことから、PD1からPD2へ向かう方向に、この両者の距離を $250 \mu\text{s} \pm 1 \mu\text{s}$ で輝点が移動するような速度で、PD1からPD2に向かう方向の輝点の動きが検出されたことになる。

同様に $t = 600 \mu\text{s}$ に別の輝点がPD1に達してパルスが発生しているが、それがPD2に達するのが $100 \mu\text{s}$ 後の $t = 700 \mu\text{s}$ であるため、出力Qは1とならず、「PD1からPD2へ $250 \mu\text{s}$ で移動する輝点の動き」は検出されなかったことになる。

4. 任意方向の動き検出のためのアーキテクチャ

通常のイメージセンサでは、受光部は正方形、あるいは六角形などの平面を埋め尽くす格子状に配置される。これは各受光部の信号を読み出すときの簡便さや、またイメージセンサの設計自身の簡素化に有効であり、また走査線によって映像を作るビデオカメラのイメージセンサには特に有効なアーキテクチャである。しかしこの格子状の受光部の配置により、平面上の輝点や輝線の方向に特異性が現われる。例えば図6(a)は正方形格子状の画素配置をもつイメージセンサによって斜め線と円を受けた場合の各受光部の信号のモデルであるが、これらの信号は斜め線や円の、正方形格子状の近似でしかない。これに対し、図6(b)のように、受光部を空間的に無作為に配置した構造を考えると、多少空間解像度が低下するものの、斜め線や円のような曲線に対しても方向の特異性が現れにくいことがわかる。このような格子配置から生じる空間の方向特異性についてはセルオートマトンなどでは比較的古くからよく研究されており [19], [20], 正方形格子配置のセルオートマトンで問題となる生成パターンの方向特異性が、図7のような擬似的にランダムな格子配置によって解消されることが報告されている。なお図6の例では、図6(b)の無作為配置の方が画素数を多くしてあるが、これは無作為配置では、同一画素数では格子状配

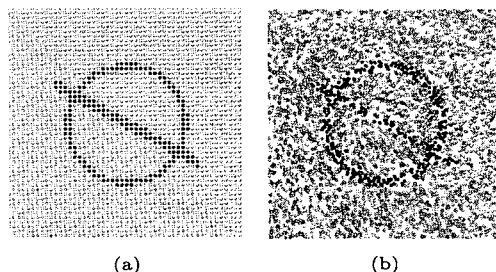


図6 画素の配置: (a) 正方形格子状配置, (b) 無作為配置
Fig. 6 Pixel placement: (a) matrix placement and (b) random placement.

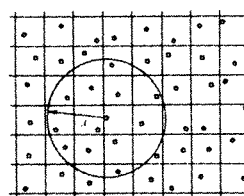


図7 等方性を確保するための正方セルモデル [19]
Fig. 7 Cell model for solving directional singularity [19].

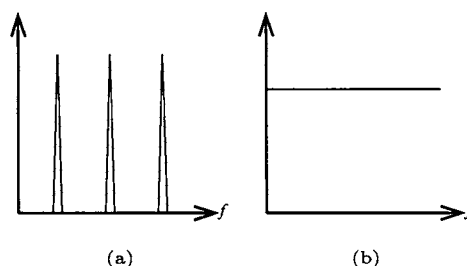


図8 画素の配置の空間スペクトル: (a) 正方形格子状配置, (b) 無作為配置
Fig. 8 Spatial spectrum of pixel placement: (a) matrix placement and (b) random placement.

置よりも実効的な解像度が下がるためである。この無作為配置での実効的な解像度の低下は根本的であり解決することは不可能であると考えられるが、解像度よりも方向の等方性の方が効果的である用途では有効であると考えられる。

受光部の空間的な配置が無作為であるということは、数学的にはその配置の空間周波数のスペクトルが図8(b)のようにホワイトノイズであり、方向による特異性もないことに対応する。すなわち理想的に空間的に無作為に配置された受光部からなるイメージセンサでは、対象となる画像に対して方向特異性が全くなくな

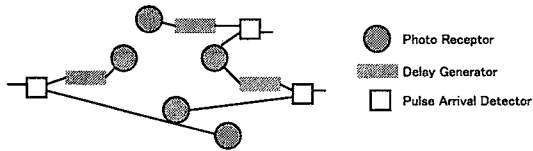


図9 無作為画素配置による任意方向動き検出回路の構成
Fig.9 System diagram of arbitrarily directional motion detector with random placement of pixels.

ると考えられる。

3.で述べた、興奮性信号の空間的伝搬遅延を用いた動体検出イメージセンサのアーキテクチャは、以下のような特長がある。

- 遅延回路による遅延を各種用意することで、様々な速度の輝点の動きを検出することができる。
- 動きの検出自体は、始点位置の受光部と終点位置の受光部の組合せのみによって決まる。

これらの特長を利用すると、各受光部の空間的な配置を図9のように無作為にすることが可能となる。すなわち様々な遅延の遅延回路を、空間的に均一な分布となるように配置し、各受光部との接続も空間的に均一な分布となるようにすることができれば、様々な速度の輝点の動きが、理想的には任意の空間的な方向に対して検出することが可能となると考えられる。ただしこのような理想的な無作為の画素配置のイメージセンサの設計方法や物理的な実現方法は困難であるため、セルオートマトンの方向特異性解消で提案されている、格子状の配置に揺らぎをもたせる方法[19]のように、基本的には格子状に配置する際に周辺に余白を残しておき、画素ごとにある程度位置をずらすことで、擬似的に無作為な画素配置を実現することが現実的であると考えられる。

またこのようなアーキテクチャでは、これらの無作為に配置した各出力Qの出力方法が問題となる。この問題に対する具体的な解決策は未検討であるが、次の二つの解決策が現実的と考えられる。

- 網膜と視覚野の間の視神経のように、更に高次の処理系まで含めて構成し、そこまで空間的な並列性を保ったままでも伝達する。
- 検出された動輝点の動きの方向だけであれば、検出された方向の x 成分と y 成分に応じた電圧 V_x, V_y を出力とし、そこから動きの方向を $\theta = \tan^{-1} y/x$ として求めるようにする。

ただしこれらの具体的な実現方法については今後の検討課題である。

また動き検出の際には、方向だけでなく速度も検出する必要があるが、この検出精度は図2の回路で発生されるパルス幅によって調節することができる。そのため高精度な速度の検出が必要な場合は、このパルス幅を短く設定すればよいが、ここで対象としている、任意方向に任意速度で移動する輝点の検出のためには検出された速度も出力しなければならない。しかし本論文で提案している、時間遅延と相関を利用する動き検出アルゴリズムでは、設定した遅延と画素の空間距離に対応する速度の有無のみしか検出できないため、広い範囲で高精度な速度の検出は、多種類の遅延素子を用意する必要があり、現実的ではない。そのためこのアルゴリズムによる動き検出では、高精度な速度検出は困難であるため、速度検出よりも方向検出が重要なアプリケーション、及びそのような高度認知アルゴリズムの前処理としての応用が現実的であると考えられる。

5. むすび

生体の網膜中での信号処理システムをモデルとした、興奮性信号のみを用い、その空間的伝搬遅延を利用した輝点の動き検出を行うアルゴリズムと、それをイメージセンサ上に集積するための回路構成について検討した。またこの回路構成では、動きの検出が二つの受光部のみの空間的位置関係によって決まることを利用し、画素を空間的に無作為に均一に配置することで方向の特異性のないイメージセンサのアーキテクチャについて提案した。このアーキテクチャに基づいた、イメージセンサの可能性は検討したが、具体的な実現方法・設計方法は今後の課題である。

謝辞 本研究の実施にあたっては、公立はこだて未来大学平成14年度学内特別研究費の助成を受けた。ここに深く感謝の意を表す。

文 献

- [1] I. Andreadis, I. Karafyllidis, P. Tzionas, A. Tharailakis, and PH. Tsalides, "A new hardware module for automated visual inspection based on a cellular automaton architecture," J. Intelligent and Robotic Systems, vol.16, no.1, pp.89-102, 1996.
- [2] M. Meribout, M. Nakanishi, and E. Hosoya, "Hough transform algorithm for three-dimensional segment extraction and its parallel hardware implementation," Computer Vision and Image Understanding, vol.78, no.2, pp.177-205, 2000.
- [3] W. Badawy and M. Bayoumi, "A multiplication-free algorithm and a parallel architecture for affine transforma-

- tion." J. VLSI Signal Processing, vol.31, no.2, pp.173-184, 2002.
- [4] G. Indiveri, "Modeling selective attention using a neuro-morphic analog VLSI device," Neural Comput., vol.12, no.12, pp.2857-2880, 2000.
- [5] R. Etienne-Cummings, V. Gruey, and M. Clapp, "High performance biomorphic image processing under tight space and power constraints," Autonomous Robots, vol.11, no.3, pp.227-232, 2001.
- [6] M. Ishikawa, K. Ogawa, T. Komuro, and I. Ishii, "A CMOS vision chip with SIMD processing element array for lms image processing," 1999 Dig. Tech. Papers of 1999 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC'99), pp.206-207, 1999.
- [7] T. Poggio, W. Yang, and V. Torre, The Computing Neuron, Addison Wesley, 1989.
- [8] J. Hutchinson, C. Koch, J. Luo, and C. Mead, "Computing motion using analog and binary resistive networks," Computer, vol.21, pp.52-63, 1988.
- [9] J. Tanner and C. Mead, "An integrated analog optical motion sensor," VLSI Signal Processing II, vol.21, pp.59-76, 1987.
- [10] J. Tanner and C. Mead, "A correlating optical motion detector," MIT Advanced Research in VLSI, pp.57-64, 1984.
- [11] W. Bair and C. Koch, "Real-time motion detection using an analog VLSI zero-crossing chip," Proc. SPIE, Visual Information Processing: From Neurons to Chips, vol.1473, pp.59-65, 1991.
- [12] A. Moini and A. Bouzerdoum, A. Yakovleff, and K. Eshraghian, "A two dimensional motion detector based on the insect vision," Proc. SPIE, Advanced Focal Plane Arrays and Electronic Cameras, pp.146-147, 1996.
- [13] M. Ohtani, H. Yonezu, and T. Asai, "Analog metal-oxide-silicon IC implementation of motion-detection network based on biological correlation model," Jpn. J. Appl. Phys., vol.39, pp.1160-1164, 2000.
- [14] C. Mead, Analog VLSI and Neural Systems, Addison Wesley Reading, 1989.
- [15] H. B. Barlow, R. M. Hill, and W. R. Levick, "Retinal ganglion cells responding selectively to direction and speed of image motion in the rabbit," J. Physiol. vol.173 pp.377-407, 1964.
- [16] W. R. Taylor, S. He, W. R. Levick, and D. I. Vaney, "Dendritic computation of direction selectivity by retinal ganglion cells," Science, vol.289 pp.2347-2350, 2000.
- [17] R. D. Smith, N. M. Grzywacz, and L. J. Borg-Graham, "Is the input to a GABAergic synapse the sole asymmetry in turtle's retinal directional selectivity?," Visual Neuroscience, vol.13, pp.423-439, 1996.
- [18] M. Takayasu, H. Takayasu, A. Koizumi, Y. Shiraishi, and A. Kaneko, "Role of random dendrites and inhibitory bypasses in retinal neuron networks," (submitted to Physical Review Letters).
- [19] M. Markus, "Modelling morphogenetic processes in ex-

citable tissues using novel cellular automata," Biomed. Biochim. Acta. vol.49, pp.681-696, 1990.

- [20] M. Markus, Z. Nagy-Ungvarai, and B. Hess, "Phototaxis of spiral waves," Science, vol.257, pp.225-227, 1992.

(平成 14 年 12 月 2 日受付, 15 年 3 月 6 日再受付)

秋田 純一 (正員)



及びアナログ並列処理システムとその応用に関する研究に従事。

高安美佐子



非平衡統計物理学, 情報物理学. 著書は, 「経済・情報・生命の臨界ゆらぎ」(ダイヤモンド社, 2000年) ほか。

高安 秀樹



ジックス市場に潜む物理法則」(日本経済新聞社, 2000) ほか。

小泉 周



1997慶大・医卒。慶大医学部生理学教室助手。2002博士(医学)。2003よりMassachusetts General Hospital (米国) にResearch Fellowとして留学中。専門は、神経科学, 視覚生理。網膜における視覚認知の神経機構を電気生理学的手法を用いて研究している。