

シリコン網膜を用いたオプティカルフローの局所計算方式

秋山 圭[†] 羅 志偉^{††} 大西 正輝^{††} 八木 哲也^{††,††}
 細江 繁幸^{†,††}

Local Computation of Optical Flow Using a Silicon Retina

Kei AKIYAMA[†], Zhi-wei LUO^{††}, Masaki ONISHI^{††}, Tetsuya YAGI^{††,††},
 and Shigeyuki HOSOE^{†,††}

あらまし 実環境下で活動するロボットへの応用を主目的として、実時間性と環境適応性をもったコンパクトなビジョンシステムの構築が望まれている。このような点を考慮したイメージセンサとして、生体の網膜における前処理機構をアナログ CMOS 集積回路上に模擬したシリコン網膜がある。本論文では、このシリコン網膜の機能と構造に特化する形で、実環境画像に対してもロバストにオプティカルフロー（撮像系に対して相対運動する物体の運動速度場）を推定する計算方式を提案する。本手法では、シリコン網膜の応答画像から運動物体のエッジを抽出し、これらについて局所計算を行うことで、実環境下においても効率良くオプティカルフローを求めることが可能である。本方式についてシリコン網膜と計算機を使用した実験を行い、良好な結果を得た。

キーワード シリコン網膜, ロボットビジョン, 実環境, オプティカルフロー, 局所計算

1. ま え が き

生体の視覚系は、時々刻々と変化する周囲の環境に対し、柔軟に適應することができる。実環境下で動作するロボットの実現を考えた場合、その視覚系（ロボットビジョン）は、実時間性や環境適応性において生体と同様の処理能力をもち、かつコンパクトで省電力なハードウェアに実現できることが必要である。

生体の網膜における生理学的知見からは、入射光の空間的な変化と時間的な変化にそれぞれ反応する二つの処理経路の存在が指摘されている [12]。また、これらの処理経路では、共通の前処理として、ラプラスアンガウス ($\nabla^2 G$) 空間フィルタ特性を近似するフィルタリングが行われていることが示されている。この $\nabla^2 G$ 型空間フィルタは、空間的に均一な成分と高周波

ノイズ成分をカットすると同時に、物体のエッジ（輪郭）などの成分に対して強く応答する特性をもつ。更に、このフィルタは実環境画像処理に適した空間周波数特性をもつことが示されている [12]。

$\nabla^2 G$ 型空間フィルタは、画像処理で一般的に用いられる局所フィルタではないため、デジタル計算機の直列的な演算では計算量が多く、実時間性に問題がある。この点を解消するため、生体の網膜における超並列情報処理手法を模擬し、光センサアレー及び抵抗回路網をアナログ VLSI チップ上に実装することで受光から処理に至るまで一貫して並列演算により行う、シリコン網膜の研究が行われている [10], [13]。つまり、シリコン網膜の特長は、アナログ抵抗回路網により実時間かつ少ない消費電力で入力画像に対する $\nabla^2 G$ 型フィルタリングを実現できる点である。

このシリコン網膜の前処理画像を利用した後段処理の一つの例として、移動物体の速度推定が挙げられる。過去に筆者らは、シリコン網膜を使用して感度調節機構をもつトラッキング実験 [1] を行った。この実験では、背景を一樣なものとして仮定することで、エッジのある領域をトラッキング対象物体としたため、複雑な背景をもつ実環境へ適用することはできなかった。複雑な背景下で対象物体を追跡する方法には、オブ

[†] 名古屋大学大学院工学研究科, 名古屋市
 Graduate school of Engineering, Nagoya University,
 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan
^{††} 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター, 名古屋市
 RIKEN, BMC, 2271-130 Anagahora, Shimoshidami,
 Moriyama-ku, Nagoya-shi, 463-0003 Japan
^{†††} 大阪大学大学院工学研究科, 吹田市
 Graduate school of Engineering, Osaka University, 2-1
 Yamadaoka, Suita-shi, 565-0871 Japan

ティカルフローの利用が考えられる。オプティカルフローの代表的な推定法としては、大きく分けてこう配法 [3], [5], 相関法 [11], エネルギーベクトル法 [2] の 3 種類が提案されているが、これらの方法は理想化された画像における計算手法であるため、ノイズの含まれる実環境画像を用いた場合は推定精度が低下すると考えられる。実環境においても精度良く推定を行うには、生体と同様の $\nabla^2 G$ 型空間フィルタリングなどの前処理を行う必要があると考えられるが、計算コストの問題から、実時間性を重視するロボットビジョンへの適用は困難であった。

そこで本研究では、主にロボットビジョンへの応用を考慮した、実環境に対するロバスト性と実時間性をもつオプティカルフロー計算方式を提案する。本研究で考えるロボットビジョンシステムを図 1 に示す。システムはシリコン網膜 [9] と、FPGA (プログラマブル論理演算 IC) で構成され、シリコン網膜は $\nabla^2 G$ 型空間フィルタリングとフレーム間差分をチップ上で行い、FPGA はシリコン網膜の内部信号のコントロールや後段の画像処理、カメラの注視点制御を行う。このシステムにより、環境適応性と実時間性をもつ、コンパクトで省電力なロボットビジョンを実現することができる。実時間処理を主眼とした従来のロボットビジョン研究には、単一の処理機能を 1 チップ化したものやチップ上に汎用な処理機能を持たせるもの [4], [6], [7], [16] が存在するが、3 次元シーンの理解などの高次処理までの過程を考えた場合、すべての処理を 1 チップで行うには限界がある。それに対し本研究のシステムは、直列演算では効率の悪い処理のみをシリコン網膜上で並列的に実行し、後段処理を FPGA により行うことで、実時間性と汎用性を両立させることができる。

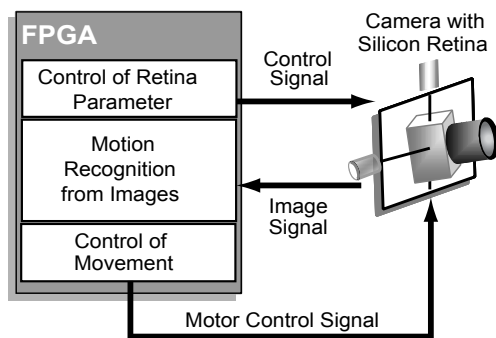


図 1 シリコン網膜を使用したロボットビジョンシステム
Fig. 1 Robot vision system with Silicon Retina.

本研究で提案するオプティカルフローの計算手法では、シリコン網膜から得られる 2 種類の応答 (輪郭強調とフレーム間差分) から運動するエッジのみを取り出し、運動するエッジが検出されたピクセルに関して局所処理により運動速度を抽出する。提案手法の利点は、生体と同様の前処理を行うことで、ノイズを含んだ実環境画像に対してもロバストな運動推定を行える点である。また、シリコン網膜による並列処理と後段での局所処理により計算量が少なく、リアルタイム演算が可能であると同時に、図 1 のようなコンパクトで省電力なハードウェアに実現することが可能である。本手法の有効性を確認するために、実環境下でシリコン網膜を用いた実験を行う。

2. 外網膜神経回路網の等価電気回路モデル

脊椎動物の網膜の中でも最も初段に位置する神経回路網を、外網膜神経回路網と呼ぶ。この外網膜神経回路網に対し、生理学的知見に基づいた等価電気回路網が提案されている [15]。図 2 にこの等価電気回路網の 1 次元的な回路図を示す。なお、シリコン網膜は、図 2 の回路網をベースとしたビジョンセンサである [18]。図 2 において、 $V_0(k)$ は k 番目のピクセルにおける光の強度に対応した入力電圧、 $V_1(k), V_2(k), V_3(k)$ は各層のノード電圧であり、出力電圧 $V_3(k)$ は、二つの層の抵抗回路網のノード電圧 $V_1(k), V_2(k)$ の差をとる。

これを数式的に説明する。まず、各ノードに対してキルヒホッフの電圧・電流則を用いることにより、各層の電位の関係式が次のように得られる。

$$C_i V_i = -\frac{R_{si}}{R_{mi}} V_{i-1} \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

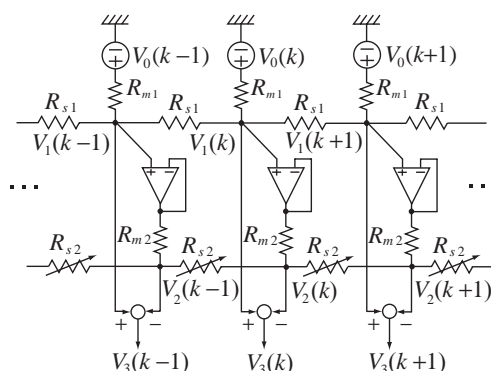


図 2 外網膜神経回路網の 1 次元等価電気回路
Fig. 2 1 dimensional equivalent circuit of the outer retinal neural circuit.

$$\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2 \quad (2)$$

ただし,

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} c_i + 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & c_i & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & c_i & 1 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & c_i & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & c_i + 1 \end{bmatrix}$$

$$c_i = - \left(2 + \frac{R_{si}}{R_{mi}} \right), \quad i = 1, 2$$

$$\mathbf{V}_i = \left[V_i(-N), V_i(-N+1), \dots, V_i(N-1), V_i(N) \right]^T, \quad 0 \leq i \leq 3$$

ピクセル数を無限大 ($N \rightarrow \infty$) とした場合, 各層の応答の解析解は, 次式のように書き表すことができる [8].

$$V_i(k) = B_i \sum_{l=-\infty}^{\infty} V_{i-1}(l) \gamma_i^{|k-l|}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$V_3(k) = V_1(k) - V_2(k) \quad (4)$$

ただし, 回路網パラメータ B_i, γ_i は, 空間定数 L_i を用いて次のように表される.

$$B_i = \frac{1}{\sqrt{4L_i^2 + 1}}, \quad L_i = \sqrt{\frac{R_{mi}}{R_{si}}},$$

$$\gamma_i = 1 + \frac{1}{2L_i^2} - \sqrt{\frac{1}{L_i^2} + \frac{1}{4L_i^4}}, \quad i = 1, 2$$

$$(0 < \gamma_i < 1)$$

図 2 の回路網は, 近似的に $\nabla^2 G$ フィルタ特性をもつことが示されている [17]. 厳密には, DoG (Difference of Gaussian) フィルタ特性を近似するものであるが, DoG フィルタは $\nabla^2 G$ フィルタを近似するため, 近似的に $\nabla^2 G$ フィルタと考えることができる [12]. $\nabla^2 G$ フィルタは, ノイズにロバストなエッジ検出が可能という特長をもつ. 以下では, この $\nabla^2 G$ 型空間フィルタ応答 $V_3(k)$ のことを, 輪郭強調応答と呼ぶ.

また, シリコン網膜は, 上記の輪郭強調応答だけでなく, 同時に時間的な差分も計算することができる. 以下ではこの応答をフレーム間差分応答 ($V_s(k)$) と呼ぶ. これは 1 層目のノード電圧 $V_1(k)$ の, 2 フレーム

間における差分値をシリコン網膜の抵抗回路網により計算するものである. すなわち,

$$V_s^{(n)}(k) = V_1^{(n-1)}(k) - V_1^{(n)}(k) \quad (5)$$

である. ただし, $^{(n)}$ は n フレーム目であることを表す.

以上のように, シリコン網膜は, 各フレームごとに空間的な変化に対する応答 $V_3^{(n)}(k)$ と, 時間的な変化に対する応答 $V_s^{(n)}(k)$ の 2 種類を抵抗回路網により高速に出力する. またこれは, 生体における空間変化と時間変化に反応する二つの主要な視覚情報処理経路を模擬したものである. 例として, ある入力パターンに対するシリコン網膜の応答を図 3 に示す. 左の列はそれぞれ原画像 (a), 輪郭強調応答 ($V_3^{(n)}$) (b), フレーム間差分応答 ($V_s^{(n)}$) (c) であり, 右の列は左の画像に破線で示した 1 ライン分の応答波形の概念図である.

次章以下では, ここまで述べたシリコン網膜の応答特性を利用した後段処理の方法を説明する. しかしながら, 図 3 を含め, 実験で用いるシリコン網膜は, 前述した 1 次元ではなく, 縦 46, 横 40 ピクセルの 2 次元抵抗回路網をもつ [9]. したがって, 以下の解析には本来 2 次元回路網モデルを用いるべきであるが, 数学的な解析が困難であるため, まず 3. で上記の 1 次元

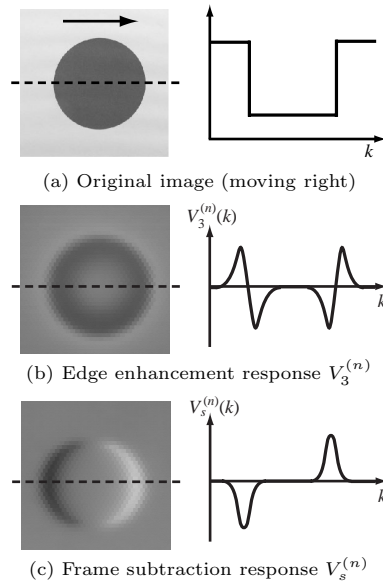


図 3 入力パターンに対するシリコン網膜の応答画像と, 1 ライン分 (点線部) の応答波形
Fig. 3 Response images to an input pattern of the Silicon Retina and their 1-D responses.

モデルを用いて解析を行い, 4. においてこの結果を 2 次元パターン処理に適用する.

3. 1 次元抵抗回路網を用いた速度抽出

ここでは, 入力パターンとして 1 次元的なステップ状の運動エッジを仮定し, このパターンに関して先に示したシリコン網膜の 1 次元抵抗回路網モデルの解析によりエッジの運動速度を抽出する.

3.1 運動エッジ検出方法

画像中において, 運動する物体などのエッジを運動エッジと定義する. 1 次元モデルにおける運動エッジの検出は次のように行う.

まず, ピクセル k におけるエッジ画像 $E^{(n)}(k)$ を次のように定義する.

$$E^{(n)}(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } V_3^{(n)}(k) \cdot V_3^{(n)}(k-1) < 0 \\ & \text{and } V_3^{(n)}(k) - V_3^{(n)}(k-1) > K_1 \\ -1 & \text{if } V_3^{(n)}(k) \cdot V_3^{(n)}(k-1) < 0 \\ & \text{and } V_3^{(n)}(k) - V_3^{(n)}(k-1) < -K_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

K_1 は正の適当なしきい値である. 隣接するピクセル間でゼロ交差を生じ, かつその差の絶対値がしきい値より大きなピクセルをエッジとする.

更に, $E^{(n)}(k)$ を利用し, 運動するエッジのみを抽出した画像 $M^{(n)}(k)$ を定義する.

$$M^{(n)}(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } E^{(n)}(k) \cdot V_s^{(n)}(k) > K_2 \\ -1 & \text{if } E^{(n)}(k) \cdot V_s^{(n)}(k) < -K_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

なお, K_2 は正のしきい値である. $M^{(n)}(k) = 1, -1$ のピクセルでは, エッジがそれぞれ正, 負の方向に移動することを示している. 以下では $M^{(n)}(k)$ を運動エッジ画像と呼ぶ. 図 4 に, 各入力パターンに対するシリコン網膜の応答と, $E^{(n)}(k), M^{(n)}(k)$ の値の関係を示す [19]. 以下の速度抽出処理は, すべて運動エッジが検出されたピクセル, すなわち $M^{(n)}(k) \neq 0$ となるピクセル k でのみ行う.

3.2 速さ情報の抽出方法

以下では解析を簡単にするため, 入力信号 $V_0(k)$ の例として, 図 5(a) に示す単一のステップ状の運動エッジについて考える.

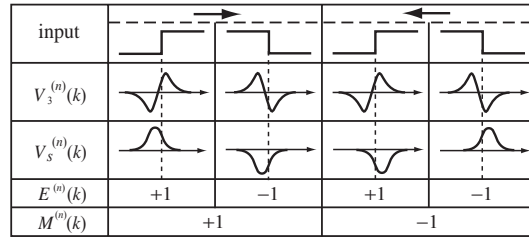


図 4 入力パターンに対するシリコン網膜の応答 ($V_3^{(n)}, V_s^{(n)}$) と, エッジ画像 ($E^{(n)}(k)$), 運動エッジ画像 ($M^{(n)}(k)$) との関係 [19]

Fig. 4 Relationships between responses of Silicon Retina ($V_3^{(n)}, V_s^{(n)}$) for some input patterns and their edge images ($E^{(n)}(k)$) and moving edge images ($M^{(n)}(k)$) [19].

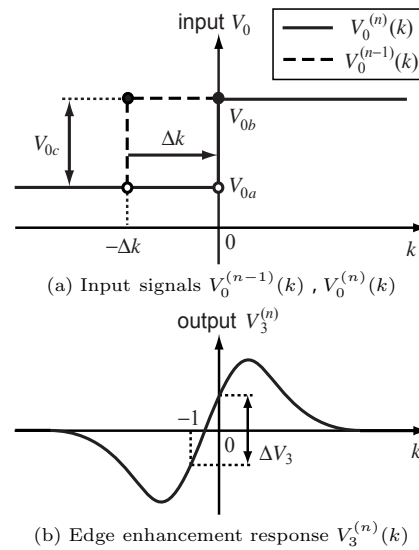


図 5 $n-1$ フレーム目 (破線) と n フレーム目 (実線) の入力信号と, n フレーム目の輪郭強調応答 $V_3^{(n)}(k)$

Fig. 5 Input signals of $n-1$ th frame (dashed line) and n th frame (solid line), and edge enhancement response of n th frame $V_3^{(n)}(k)$.

図 5(a) のように, n フレーム目のエッジの位置を原点にとり, Δk を単位時間でのエッジの移動量とする. また, $n-1$ フレーム目における入力 $V_0^{(n-1)}(k)$ は, $k < -\Delta k$ で V_{0a} , $k \geq -\Delta k$ で V_{0b} とし, 同様に n フレーム目の入力 $V_0^{(n)}(k)$ は, $k < 0$ で V_{0a} , $k \geq 0$ で V_{0b} とする.

以下では $\Delta k > 0$ の場合について考える. 本手法ではフレーム間差分応答に注目し, 応答から速さ情報を抽出する. 図 5(a) の場合, 式 (5) よりフレーム間差分応答 $V_s^{(n)}(k)$ は次のように表される.

$$\begin{aligned}
 V_s^{(n)}(k) &= B_1 \left(V_{0a} \sum_{l=-\infty}^{-\Delta k-1} \gamma_1^{|k-l|} + V_{0b} \sum_{l=-\Delta k}^{\infty} \gamma_1^{|k-l|} \right) \\
 &\quad - B_1 \left(V_{0a} \sum_{l=-\infty}^{-1} \gamma_1^{|k-l|} + V_{0b} \sum_{l=0}^{\infty} \gamma_1^{|k-l|} \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

式(8)を整理し、図5(a)に示すようにエッジのコントラストを $V_{0c} = V_{0b} - V_{0a}$ とおく。更に両辺の絶対値をとると、 $B_1 > 0, \gamma_1 > 0$ より次式が得られる。

$$|V_s^{(n)}(k)| = B_1 |V_{0c}| \sum_{l=-\Delta k}^{-1} \gamma_1^{|k-l|} \quad (9)$$

応答の対称性より、 $|V_s^{(n)}(k)|$ は $-\Delta k$ と 0 の中心の座標で極値をとる。この極値を $V_{ext}^{(n)}$ とすると、 $V_{ext}^{(n)}$ をとるピクセル k は次のように表すことができる。

・ Δk が奇数のとき

$$k = -\frac{\Delta k + 1}{2} \quad (10)$$

・ Δk が偶数のとき

$$k = -\frac{\Delta k}{2}, \quad -\frac{\Delta k}{2} - 1 \quad (11)$$

式(9)より、式(10)、(11)における $|V_{ext}^{(n)}|$ は次のように求まる。

・ Δk が奇数のとき、

$$\begin{aligned}
 |V_{ext}^{(n)}| &= V_s^{(n)} \left(-\frac{\Delta k + 1}{2} \right) \\
 &= \frac{B_1 |V_{0c}|}{1 - \gamma_1} \left[1 + \gamma_1 - 2\gamma_1^{\frac{|\Delta k|+1}{2}} \right] \quad (12)
 \end{aligned}$$

・ Δk が偶数のとき、

$$\begin{aligned}
 |V_{ext}^{(n)}| &= V_s^{(n)} \left(-\frac{\Delta k}{2} \right) = V_s^{(n)} \left(-\frac{\Delta k}{2} - 1 \right) \\
 &= \frac{B_1 |V_{0c}|}{1 - \gamma_1} \left[(1 + \gamma_1) \left(1 - \gamma_1^{\frac{|\Delta k|}{2}} \right) \right] \quad (13)
 \end{aligned}$$

ここでは Δk が奇数の場合を考える。式(12)を Δk に関して解くと次式を得ることができる。

$$|\Delta k| = 2 \log_{\gamma_1} \left[\frac{1}{2} \left\{ 1 + \gamma_1 - \frac{|V_{ext}^{(n)}|}{B_1 |V_{0c}|} (1 - \gamma_1) \right\} \right] - 1 \quad (14)$$

すなわち、式(14)を用いれば、応答からフレーム間差分画像の極値 $|V_{ext}^{(n)}|$ を観測し、更にエッジのコントラスト $|V_{0c}|$ を抽出することで、エッジ移動量 $|\Delta k|$ を求めることができる。シリコン網膜の空間的な相互作用により、各ピクセルにおける応答は近傍ピクセルの情報も含んでいる。このため、式(14)のように応答の局所的な情報を利用するだけでエッジの移動量を得ることができる。図6に、式(14)で $V_{0c} = 100$ [mV] としたときの $|\Delta k|$ と $|V_{ext}^{(n)}|$ の関係を示す。ただし、 $B_1 = 0.264, \gamma_1 = 0.582$ とした。

3.3 コントラストの補償

式(14)を用いて $|\Delta k|$ を求めるためには、エッジのコントラスト $|V_{0c}|$ が必要である。以下では、輪郭強調応答 $V_3^{(n)}(k)$ から V_{0c} を抽出できることを示す。

入力パターンは前節と同じものを用いる。この場合、輪郭強調応答 $V_3^{(n)}(k)$ は、図5(b)のように $k = -1$ と 0 の間でゼロ交差を生じる。このとき、ゼロ交差をはさむ2ピクセル ($k = -1, 0$) の抵抗回路網の1層目の出力は、式(3)より以下のように得られる。

$$\begin{aligned}
 V_1^{(n)}(-1) &= \frac{V_{0a} + \gamma_1 V_{0b}}{1 - \gamma_1} B_1 \\
 V_1^{(n)}(0) &= \frac{\gamma_1 V_{0a} + V_{0b}}{1 - \gamma_1} B_1 \quad (15)
 \end{aligned}$$

式(15)の差分 $\Delta V_1^{(n)}$ は、 $V_{0c} = V_{0b} - V_{0a}$ より次のように得られる。

$$\Delta V_1^{(n)} = V_1^{(n)}(0) - V_1^{(n)}(-1) = B_1 V_{0c} \quad (16)$$

同様に、2層目の出力と傾きは、式(3)より次のように得られる。

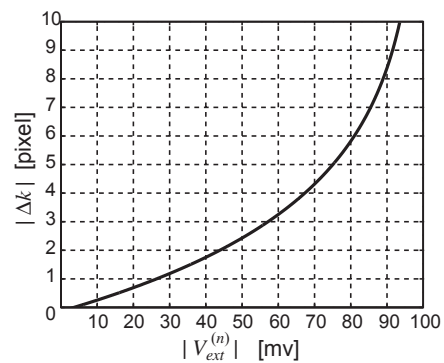


図6 式(14)における $|\Delta k|$ と $|V_{ext}^{(n)}|$ の関係

Fig. 6 Relationship between $|\Delta k|$ and $|V_{ext}^{(n)}|$ of eq.(14).

$$V_2^{(n)}(-1) = \frac{B_1 B_2}{1 - \gamma_1} \left\{ \frac{\gamma_1(1 - \gamma_2) + \gamma_2(1 - \gamma_1^2 \gamma_2)}{(1 - \gamma_2)(1 - \gamma_1 \gamma_2)} V_{0a} + \frac{1 - \gamma_1^2 \gamma_2 + \gamma_1 \gamma_2(1 - \gamma_2)}{(1 - \gamma_2)(1 - \gamma_1 \gamma_2)} V_{0b} \right\}$$

$$V_2^{(n)}(0) = \frac{B_1 B_2}{1 - \gamma_1} \left\{ \frac{1 - \gamma_1^2 \gamma_2 + \gamma_1 \gamma_2(1 - \gamma_2)}{(1 - \gamma_2)(1 - \gamma_1 \gamma_2)} V_{0a} + \frac{\gamma_1(1 - \gamma_2) + \gamma_2(1 - \gamma_1^2 \gamma_2)}{(1 - \gamma_2)(1 - \gamma_1 \gamma_2)} V_{0b} \right\}$$

$$\Rightarrow \Delta V_2^{(n)} = V_2^{(n)}(0) - V_2^{(n)}(-1) = \frac{1 + \gamma_1 \gamma_2}{1 - \gamma_1 \gamma_2} B_1 B_2 V_{0c} \quad (17)$$

式 (16), (17) を式 (4) に代入すると, 出力 $V_3^{(n)}$ の傾き $\Delta V_3^{(n)}$ が

$$\begin{aligned} \Delta V_3^{(n)} &= V_3^{(n)}(0) - V_3^{(n)}(-1) = \Delta V_1^{(n)} - \Delta V_2^{(n)} \\ &= \left(1 - B_2 \frac{1 + \gamma_1 \gamma_2}{1 - \gamma_1 \gamma_2} \right) B_1 V_{0c} \quad (18) \end{aligned}$$

と得られる. 式 (18) を V_{0c} に関して解くと, $\Delta V_3^{(n)}$ と V_{0c} は次式のような比例関係で表すことができる.

$$V_{0c} = \frac{1}{B_1} \left\{ \frac{1 - \gamma_1 \gamma_2}{(1 - \gamma_1 \gamma_2) - B_2(1 + \gamma_1 \gamma_2)} \right\} \Delta V_3^{(n)} \quad (19)$$

すなわち, 式 (19) より, 輪郭強調応答のゼロ交差点での傾き $\Delta V_3^{(n)}$ を観測することで, コントラスト情報 V_{0c} を抽出することができる.

式 (19) を式 (14) に代入することにより, 最終的に次の式が得られる.

$$\begin{aligned} |\Delta k| &= 2 \log_{\gamma_1} \left[\frac{1}{2} \left\{ 1 + \gamma_1 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left| \frac{V_{ext}^{(n)}}{\Delta V_3^{(n)}} \right| \left(1 - B_2 \frac{1 + \gamma_1 \gamma_2}{1 - \gamma_1 \gamma_2} \right) (1 - \gamma_1) \right\} \right] - 1 \quad (20) \end{aligned}$$

すなわち, シリコン網膜の 2 種類の応答から $|V_{ext}^{(n)}|$ と $|\Delta V_3^{(n)}|$ を観測することで, エッジの移動量 $|\Delta k|$ が求まることが分かる.

4. 2次元入力パターンにおける速度抽出

これまでの解析には 1 次元回路網を使用したが, 前述のように, 実際のシリコン網膜は縦 46, 横 40 ピクセルの 2 次元抵抗回路網をもつ. そこで, 本章では 2 次元入力パターン処理に対して 3. の速度抽出方法を適用することで, エッジの運動方向と速さの法線成分

をそれぞれ求める. また, 本方式では, 局所領域の情報を使用してエッジの運動方向検出を行う. ただし, 局所領域の情報から物体の正確な運動方向を特定することは, 窓問題により難しい [14] ため, ここではエッジの法線に関する運動方向の範囲を求める. 以下では, エッジが十分に長い直線で, かつ単位時間では平行移動すると仮定する.

4.1 エッジの運動方向検出

本研究で使用するシリコン網膜は, 図 7 に示される六角ピクセル格子となっている. 図中では, 六角形の点線で囲まれた領域が一つのピクセル領域であり, 中心の黒い四角形は光検出器, それらを結ぶ実線はピクセル間の接続を表す. ここでは, ピクセル A における処理方法を説明する. また, 前述のエッジに関する仮定を満たすエッジの一例として, 図中に示した, 実線を境に上側が白, 下側が黒のステップ状のエッジをもつ運動パターンを用いて説明する.

まず, ピクセル A, B, C をピクセル A の局所領域とする. この局所領域内の三つの接続 (BC, AC, AB) に関して, 式 (6) によりエッジ検出を行う. ただし, エッジの正の方向を図 7 の右側の三角形にある矢印方向 ($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$) とし, 接続 BC, AC, AB における n フレーム目のエッジ検出結果を, それぞれ $E_0^{(n)}(A), E_{60}^{(n)}(A), E_{120}^{(n)}(A)$ とする. 図 7 の例の場合では, $E_0^{(n)}(A) = E_{60}^{(n)}(A) = 1, E_{120}^{(n)}(A) = 0$ となる.

更に, 運動エッジ検出を次式により行う.

$$M_\alpha^{(n)}(A) = \begin{cases} 1 & \text{if } E_\alpha^{(n)}(A) \cdot V_s^{(n)}(A) > K_3 \\ -1 & \text{if } E_\alpha^{(n)}(A) \cdot V_s^{(n)}(A) < -K_3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha = 0 \text{ or } 60 \text{ or } 120 \quad (21)$$

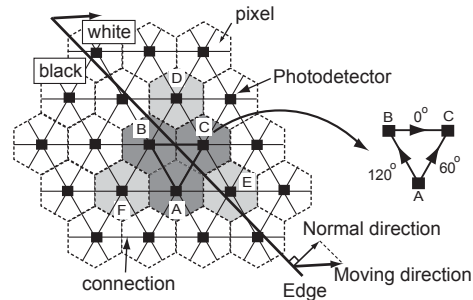


図 7 2次元入力パターンにおけるエッジの運動方向検出
Fig. 7 Detection of moving direction of an edge for a 2-D pattern.

K_3 は正のしきい値とする．例の場合は， $M_0^{(n)}(A) = M_{60}^{(n)}(A) = 1, M_{120}^{(n)}(A) = 0$ となる．このように，エッジを十分に長い直線と仮定すると，局所領域において運動エッジが検出されるのは三つの接続のうち二つである．更に，エッジが平行移動するという仮定により，起こり得る $M_0^{(n)}(A), M_{60}^{(n)}(A), M_{120}^{(n)}(A)$ の組合せは，表 1 の左側の 6 通りとなる．

次に，エッジの法線に関する運動方向の範囲を求める．最初に個々の接続のみについて考える．エッジの法線に関する運動方向を θ_A とすると，各接続におけるそれぞれの運動エッジ検出結果 $M_0^{(n)}(A), M_{60}^{(n)}(A), M_{120}^{(n)}(A)$ から， θ_A は各接続方向を中心とする 180° の範囲に含まれる．

$$\begin{aligned}
 M_0^{(n)}(A) &= \begin{cases} 1 & \Rightarrow -90^\circ < \theta_A < 90^\circ \\ -1 & \Rightarrow 90^\circ < \theta_A < 270^\circ \end{cases} \\
 M_{60}^{(n)}(A) &= \begin{cases} 1 & \Rightarrow -30^\circ < \theta_A < 150^\circ \\ -1 & \Rightarrow 150^\circ < \theta_A < 330^\circ \end{cases} \quad (22) \\
 M_{120}^{(n)}(A) &= \begin{cases} 1 & \Rightarrow 30^\circ < \theta_A < 210^\circ \\ -1 & \Rightarrow -150^\circ < \theta_A < 30^\circ \end{cases}
 \end{aligned}$$

更に，前述のように運動エッジが検出されるのは三つの接続のうち二つであるため， θ_A は式 (22) のうちの二つの角度領域の積集合に含まれる．例の場合では， $-30^\circ < \theta_A < 90^\circ$ となる．なお，他の組合せの場合は，表 1 の右側の列に示すように，6 種類の 120° の角度領域となる．なお，これ以外のエッジの組合せに関しては角度領域を決めることができないため，計算を行わない．

また，局所領域を大きくすることで，角度 θ_A の範囲を狭めることが可能である．3 ピクセルからなる局所領域における運動エッジ検出条件 (式 (21)) を満たした上で，局所領域を図 7 の薄い灰色で示される 3 ピクセルにまで拡大し，ピクセル AD, BE, CF 間で式

表 1 運動エッジの値と運動方向の範囲の関係
Table 1 Relationship between values of moving edge and area of moving direction.

$M_0^{(n)}$	$M_{60}^{(n)}$	$M_{120}^{(n)}$	direction area
1	1	0	$-30^\circ < \theta_A < 90^\circ$
-1	0	1	$90^\circ < \theta_A < 210^\circ$
0	-1	-1	$210^\circ < \theta_A < 330^\circ$
0	1	1	$30^\circ < \theta_A < 150^\circ$
-1	-1	0	$150^\circ < \theta_A < 270^\circ$
1	0	-1	$-90^\circ < \theta_A < 30^\circ$

(22) と同様に角度の範囲を求め，積集合をとると，12 種類の 60° の角度領域が得られる．この場合，より精密な推定が可能であるが，計算時間は増大する．

4.2 運動速さ検出

3.2, 3.3 で述べた速さ抽出方法を，ここでは 2 次元パターンに適用する．4.1 と同様に，運動するエッジが十分に長い直線で，単位時間に並進すると仮定すると，エッジに沿って現れるフレーム間差分画像の極値 $V_{ext}^{(n)}$ は，エッジの法線方向への移動速度に対応すると考えることができる．そこで，フレーム間差分画像出力の極値 $|V_{ext}^{(n)}|$ をピクセル A に隣接する領域内で探索する．

一方，輪郭強調応答のゼロ交差における傾き $\Delta V_3^{(n)}$ は，エッジの法線方向に関して求める必要がある．しかし，隣接エッジの接続方向は前述のように 3 通りであるため，ここではエッジの検出された接続における $\Delta V_3^{(n)}$ の平均をとる．得られた $|V_{ext}^{(n)}|, \Delta V_3^{(n)}$ を式 (20) に代入することで，法線方向の速さ $|\Delta k|$ を得る．

4.3 計算手順と計算量の評価

ここで，2 次元入力パターンにおける 1 画素当たりの処理手順を図 8 に示す．

- (1) シリコン網膜の応答 $V_3^{(n)}, V_s^{(n)}$ より，運動エッジ $M_0^{(n)}, M_{60}^{(n)}, M_{120}^{(n)}$ の検出を行う (式 (21))．
 - (2) $M_0^{(n)}, M_{60}^{(n)}, M_{120}^{(n)}$ から，エッジの法線に関する運動方向 θ_A の範囲を決定する (表 1)．
 - (3) $V_s^{(n)}$ より極値 $V_{ext}^{(n)}$ を探索する．これと同時に， $V_3^{(n)}$ より $\Delta V_3^{(n)}$ を観測する．
 - (4) $V_{ext}^{(n)}, \Delta V_3^{(n)}$ を式 (20) に代入することで，エッジの運動速さの法線方向成分 $|\Delta k|$ を求める．
- 最終的に，(2) の角度領域と $|\Delta k|$ をもって，エッジの法線に関する運動速度の推定値とする．(1) ~ (4) よ

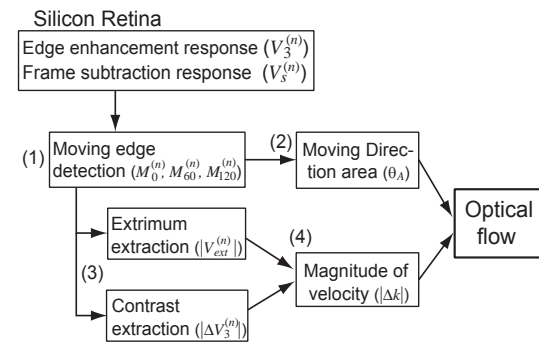


図 8 1 画素当たりの処理の流れ
Fig. 8 Flow chart of process for a pixel.

り、本手法が運動エッジのみを検出し、かつピクセルごとの局所処理により運動推定を行うことから、計算量は十分少ないといえる。

5. 実験

前章までの解析をもとに、シリコン網膜を使用して実験を行った。最初に1次元入力パターンを使用し、3.の方法を検証した。次に2次元パターンを使用し、4.の速度ベクトル推定方法を検証した。

実験システムは図1と同様のものを用いた。写真を図9に示す。今回の実験には縦46、横40ピクセルの2次元抵抗回路網をもつシリコン網膜を用い、定数回路パラメータは $R_{m1} = R_{m2} = 10[M\Omega]$, $R_{s1} = 3.0[M\Omega]$, $R_{s2} = 1.0[M\Omega]$, サンプルング時間は16[ms]とした。

5.1 1次元入力パターン処理

一定速度で水平方向に平行移動する右半分が黒、左半分が白の1次元パターンを、カメラから70[cm]離れた液晶ディスプレイにより提示した。シリコン網膜の各応答画像から中間の1ライン分の応答を取り出し、3.の方法で水平方向への1次元速度検出実験を行った。また照明条件として、ディスプレイで白色パターンを提示したときのカメラに入射する光の照度を240[lux], 320[lux], 430[lux]の3種類とした。

図10に、入力パターンを0.37[pixel/frame]で移動させた場合の各照明条件における実験結果を示す。左図が、1フレーム分のシリコン網膜の輪郭強調と、フレーム間差分の各応答画像における中間の1ライン分(23行目)をプロットしたものであり、右図が、横軸に時間を取った場合のエッジ運動速度の計算結果(実線)と、入力パターンの運動速度(点線)を比較したものである。図10右側のグラフより、計算結果はややばらつきが存在するが、いずれの場合もほぼ入力パターン速度に近い値が得られている。

更に、異なる八つの入力パターンの移動速度に対し、

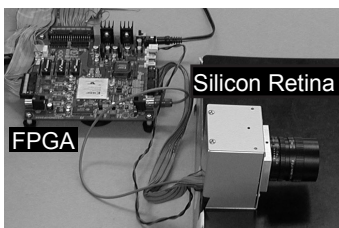


図9 実験システムの写真
Fig. 9 The picture of experimental system.

同様の実験を行った。このときの各入力パターン速度と計算結果の平均値の関係を図11に、計算結果(単位[pixel/frame])の2乗誤差平均を表2に示す。図11の横軸は入力パターンの速度、縦軸は計算結果の平均

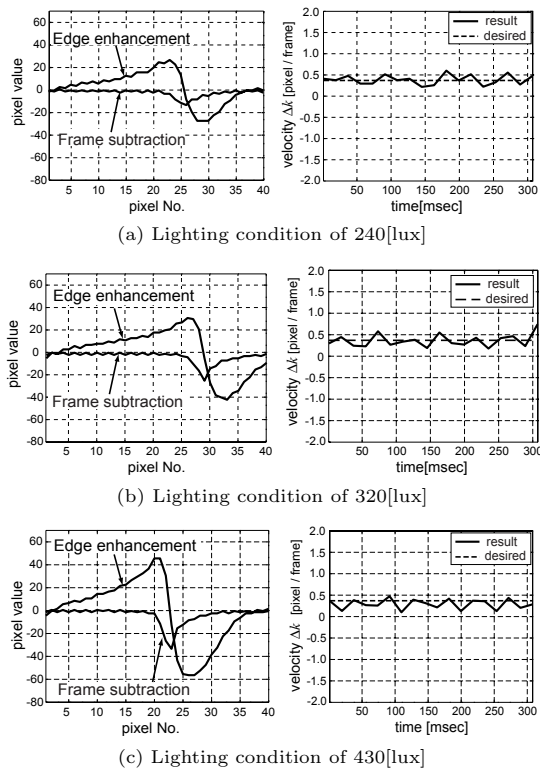


図10 0.37[pixel/frame]で運動する1次元入力パターンに対するシリコン網膜の応答波形(左)と速度検出結果(右)
Fig. 10 Responses of the Silicon Retina(left) and velocity computational results(right) of 1-D input pattern moving at 0.37[pixel/frame].

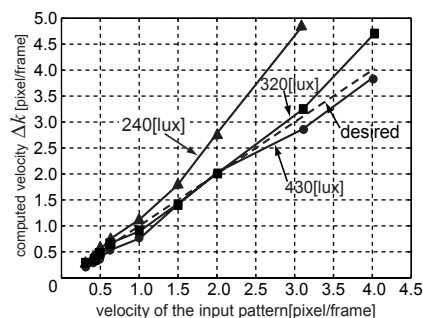


図11 入力パターン速度と計算結果の平均値との関係
Fig. 11 Relationships between velocities of input pattern and mean values of computed results.

表 2 1次元入力パターンによる実験結果 (2乗誤差平均)
Table 2 Experimental results of 1-D input patterns(mean square error).

移動速度 [pixel/frame]	240[lux]	320[lux]	420[lux]
0.31	0.0068	0.017	0.016
0.37	0.013	0.022	0.020
0.47	0.033	0.025	0.022
0.62	0.063	0.071	0.024
1.01	0.48	0.06	0.11
1.49	1.09	0.22	0.081
2.02	2.29	0.56	0.36
3.10	4.85	1.80	0.21
4.03	—	4.17	3.88

値である．表 2 中の横線は計算結果が得られなかったことを示す．

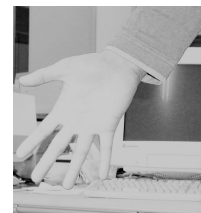
図 11 と表 2 より，いずれの照明条件においても，入力速度が大きくなるに従い計算結果の誤差が拡大する傾向にあるが，ほぼ入力速度に近い結果が得られている．240[lux] の場合は比較的誤差が大きいものの，計算結果を線形的に補正することで正しい値を得ることが可能と考えられる．また，実験結果に現れたフレームごとの計算結果の変動や，照明条件や入力速度による値の誤差の原因としては，シリコン網膜の回路パラメータの同定誤差や，フォトディテクタや MOS 抵抗の不確かな非線形特性 [8] の影響などが考えられる．

以上の実験結果から，シリコン網膜自体は 2 次元の抵抗回路網をもつものの，1 次元的な運動パターンに対してほぼ正しい値を得ることができた．

5.2 2次元入力パターン処理

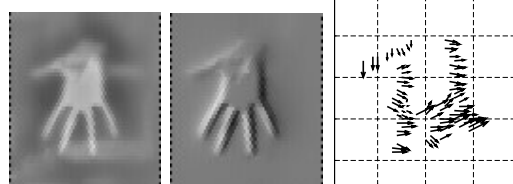
更に，実環境画像を用いて 2 次元入力パターン処理実験を行った．静止した室内風景のもとで，カメラから約 1[m] 離れた地点で手を左右に動かし (図 12(a))，手の輪郭のオプティカルフロー推定を行った．なお，ここでは図 7 に濃い灰色で示した 3 ピクセルを局所領域とした．

図 12(b)~(e) に 11, 26, 34, 48 フレーム目のシリコン網膜応答と計算結果を示す．各列は，それぞれ左から輪郭強調応答，フレーム間差分応答，フロー推定結果である．なお，4.1 で得られた角度領域の中心を矢印の方向として表示した．図より，いずれのフレームにおいても，背景のパターンに影響されずに運動するエッジの輪郭をほぼ正しく検出し，法線方向に対応した運動の方向と大きさが得られていることが分かる．手の輪郭以外やエッジが入り組んでいる部分などで誤ったフローを検出しているピクセルが存在するが，検出されたフローは大部分において局所的な運動速度

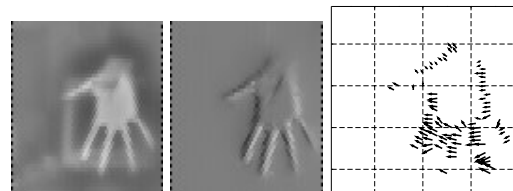


(a) Original image

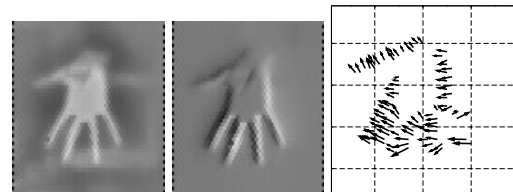
Edge enhancement response Frame subtraction response Computational result of optical flow



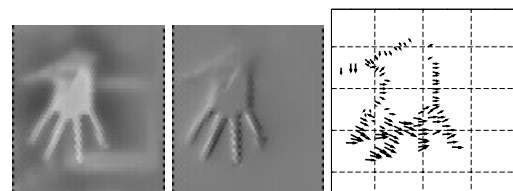
(b) 11th frame



(c) 26th frame



(d) 34th frame



(e) 48th frame

図 12 2次元パターン処理結果

Fig. 12 Experimental results of 2-D patterns.

と一致した．このことから，提案手法により実環境画像に対してフロー推定を行えることが示された．

5.3 評価

1次元入力パターン処理結果より，入力パターンの運動速度に近い計算結果が得られた．このため，提案した速度抽出方法は妥当性をもつといえる．また，

局所処理であるにもかかわらず、実験結果は比較的広い範囲の入力速度に対して良好な特性を示している。これは、提案手法がシリコン網膜の応答に含まれる空間的な相互作用を利用しているためである。

また、2次元パターン処理結果より、背景に影響されことなく対象物体の運動ベクトルを推定することに成功した。このことから、1次元の方法を2次元パターン処理に適用することで、実環境下の複雑な背景下であっても運動物体の速度ベクトルを効率良く求めることができたといえる。提案手法以外には画像の局所的なマッチングを行う方法などが考えられるが、本手法は処理に要する計算量が少ない点で優れていると考えられる。

また本実験では、シリコン網膜カメラのフレームサンプリング時間を16[ms]としたが、この時間は光センサの電荷蓄積時間が規定するもので、快晴時の太陽光程度の照明下では、光センサの蓄積時間を短縮することによって、フレームサンプリング時間を1[ms]程度まで縮めることができる。したがって計算上は、このような照明環境においては、本実験の10倍程度の速度に対応することも可能である。

6. む す び

実環境ロボットに用いる視覚系には、環境適応性と実時間性を持ち、かつコンパクトで省電力性なハードウェアに実現できることが要求される。本論文では、生体と同様の前処理を行うシリコン網膜を用いた、実環境でもロバストにオプティカルフローの推定できる計算方式を提案した。提案手法をシリコン網膜を用いた実環境下での実験により検証し、背景に左右されずに運動推定を行えることを確認できた。また、本手法はシリコン網膜の並列処理と後段での局所処理により、計算量が少ない利点をもつ。このため、図1のロボットビジョンシステムに実装することにより、複雑な背景を含む実環境下に適応した運動物体検出を実時間で行うことが可能である。本研究結果は、省電力で自然画像処理に適したシリコン網膜を用いた画像処理の有用性を示しているといえる。

謝辞 本研究に関して議論に応じて下さった亀田成司氏、下ノ村和弘氏、井上恵介氏をはじめとする大阪大学八木研究室の皆様、並びに理化学研究所の上山英三氏、名古屋大学大学院の安部典男氏に感謝致します。

文 献

[1] N. Abe, Z.W. Luo, K. Akiyama, T. Yagi, and

- S. Hosoe, "Adaptive visual tracking system under changing lighting environment," Proc. SICE Annual Conference, TEA04-1, pp.1539-1540, 2002.
- [2] E.H. Adelson and J.R. Bergen, "Spatiotemporal energy models for the perception of motion," J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci., vol.2, no.2, pp.284-299, Feb. 1985.
- [3] A. Beghdadi, M. Mesbah, and J. Monteil, "A fast incremental approach for accurate measurement of the displacement field," Image and Vision Computing, vol.21, pp.383-399, 2003.
- [4] C.M. Higgins, R.A. Deuschmann, and C. Koch, "Pulse-based 2-D motion sensors," IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog Digit. Signal Process., vol.46, no.6, pp.677-687, June 1999.
- [5] B.K.P. Horn and B.G. Schunck, "Determining optical flow," Artif. Intell., vol.17, pp.185-203, 1981.
- [6] J. Hutchinson, C. Koch, J. Luo, and C. Mead, "Computing motion using analog and binary resistive networks," Computer, vol.21, no.3, pp.52-63, March 1988.
- [7] 鏡 慎吾, 小室 孝, 石井 抱, 石川正俊, "実時間視覚処理のためのビジョンチップシステムの開発," 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.6, pp.976-984, June 2001.
- [8] 亀田成司, 生態視覚系を模擬したシリコン網膜の開発, 九州工業大学博士論文, 2001.
- [9] S. Kameda and T. Yagi, "An analog VLSI chip emulating sustained and transient response channels of the vertebrate retina," IEEE Trans. Neural Netw., vol.14, no.5, pp.1405-1412, Sept, 2003.
- [10] C. Koch and H. Li, eds., Vision chips: implementing vision algorithms with analog VLSI circuits, IEEE computer society press, 1995.
- [11] J.J. Little, "Accurate early detection on discontinuities," in Vision Interface, pp. 97-102, 1992.
- [12] D. Marr, Vision, W. H. Freeman, San Francisco, CA, 1982.
- [13] C. Mead, Analog VLSI and Neural Systems, Addison-Wesley, 1989.
- [14] J.A. Movshon, E.H. Adelson, M.S. Gizzi, and W.T. Newsome, "The analysis of moving patterns," in Pattern Recognition Mechanisms, ed. C. Chagas, R. Gattass and C. Gross, pp.117-151, Springer-Verlag: Berlin, 1986.
- [15] S. Ohshima, T. Yagi, and Y. Funahashi, "Computational studies on the interaction between red cone and H1 horizontal cell," Vision Res. vol.35, no.1, pp.149-160, 1995.
- [16] A. Torralba and J. Héroult, "An efficient neuro-morphic analog network for motion estimation," IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl., vol.46, no.2, pp.269-280, Feb. 1999.
- [17] 八木哲也, 大島成通, 舟橋康行, "初期視覚における網膜双極細胞の機能について," 信学論 (D-II), vol.J78-D-II, no.7, pp.1123-1133, July 1995.

- [18] 八木哲也, 亀田成司, 飯塚邦彦, “可変受容野を備えた超並列アナログ知能視覚センサ,” 信学論 (D-I), vol. J81-D-I, no. 2, pp. 104–113, Feb. 1998.
- [19] 八木哲也, “シリコン視覚野,” 日本神経回路学会誌, vol. 8, no. 2, pp. 65–69, 2001.

(平成 16 年 1 月 22 日受付)



秋山 圭

2001 名大・工・機械航空卒。2003 同大学院博士前期課程了。現在, 同大学院博士後期課程在学中。超並列分散構造を用いた実時間情報処理の研究に従事。計測自動制御学会, 日本ロボット学会各学生会員。



羅 志偉

1984 中国華中工学院自動制御と計算機学部卒業。同年中国蘇州大学教師, 1986 愛工大客員研究員。1991 名大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程了。1992 同大学院博士後期課程了。同年豊橋技科大助手。理化学研究所フロンティア研究員, 山形大学工学部助教授を経て, 現在, 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・環境適応ロボットシステム研究チーム・チームリーダー。ロボティクス, 制御工学の研究に従事。計測自動制御学会, 日本神経回路学会, IEEE 等各会員。工博。



大西 正輝 (正員)

1997 阪府大・工・情報卒。2002 同大学院博士後期課程了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターフロンティア研究員, 現在に至る。ロボットの認知・知識処理に関する研究に従事。電気学会, 日本ロボット学会, 映像情報メディア学会各会員。工博。



八木 哲也 (正員)

1979 名大・理卒。1981 同大学院工学研究科博士前期課程了。1985 同大学院医学研究科満了。岡崎生理学研究所研究員, 日本学術振興会特別研究員, 名工大助手, ロックフェラー大学博士研究員, 九工大助教授を経て, 2001 大阪大学大学院工学研究科教授。視覚生理学及び脳型デバイスに関する研究に従事。日本エム・イー学会, 計測自動制御学会, 日本神経科学会, 北米神経科学会等各会員。医博。



細江 繁幸

1965 名大・工・金属卒。1967 同大学院博士前期課程了。同年名大・工・助手。同大講師, 助教授を経て 1988 名大・工・情報工学科教授。1993 同大学院工学研究科電子機械工学専攻教授。1999 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・制御系理論研究チーム・チームリーダーを併任, 2001 同研究所センター長, 同運動系システム制御理論研究チームリーダーを併任, 現在に至る。その間, 制御理論, システム理論などに関する研究に従事。計測自動制御学会, 電気学会, 機械学会, システム制御情報学会, IEEE 各会員。工博。