

局所 Log-Polar 対称性に基づく固視微動型画像特徴抽出

本 谷 秀 堅^{†1} 柴 田 潤^{†2}
来 海 暁^{†3} 安 藤 繁^{†4}

本稿では画像の特徴抽出を、新たに開発される固視微動型イメージセンサを用いて行う手法を提案する。抽出する画像特徴は局所的な Log-Polar 対称性である。提案手法においては、まずイメージセンサを周期的に振動させる。振動させることにより、イメージセンサの各受光素子は周期的に時間変化する信号を出力するようになる。イメージセンサの振動を適切に行うことにより、各受光素子近傍のパターンを半径方向成分と回転方向成分とに分離し、それぞれを異なる時間周波数へと変調する。次に受光素子からの出力信号をくし型フィルタに通し時間積分することにより、出力信号中の各成分のエネルギーを算出する。イメージセンサは、全エネルギーに占める半径方向成分のエネルギーおよび回転方向成分のエネルギーの割合を出力する。この出力値は各受光素子の位置近傍における、パターンの Log-Polar 対称性を表している。シミュレーションにより提案手法が局所的な Log-Polar 対称性を抽出できることを確認し、また、Log-Polar 対称な点がエッジやコーナ、尾根線などを含む従来の特徴点を含むことを示す。

Vibratory Image Feature Extraction Based on Local Log-Polar Symmetry

HIDEKATA HONTANI,^{†1} JUN SHIBATA,^{†2} AKIRA KIMACHI^{†3}
and SHIGERU ANDO^{†4}

We propose a feature extraction method for a newly developed *vibratory image sensor*. The proposed method extracts the local log-polar symmetry as an image feature. The principle is as follows: the periodic vibration of the image sensor modulates radial and angular components of local image pattern into separated temporal frequency components of incident light on a pixel. The comb type filters after the photo-detector decompose each component and accumulate their power in a frame time. They are read out to calculated unevenness between them as the symmetricity features. Simulations show that the extracted local symmetry corresponds with the edge, corner, ridge, and other characteristic points of an image.

1. はじめに

視覚システム全体の性能を向上させるうえで、初期処理における画像の局所の特徴の有効で精度の良い抽出は大変に重要である。このため画像の特徴抽出演算

子やアルゴリズムの研究には長い歴史があり、数多くの方法が提案されてきている。1つの方向は、エッジや線素やコーナなど、特定の局所の特徴について抽出の位置精度や SN 比を上げる研究であり^{(3),(4),(6)}、1つの方向は、どのような特徴を抽出すべきかの考察に立ち戻った研究である^{(2),(9),(12)}。しかし、後者の議論は視覚生理学や視覚心理学に立脚するもの⁽¹²⁾など比較的少数の試みに限られており、初期画像処理は、いまだその目標においても確立した段階に達しているとはいえない。

一方、人の視覚系においてごく初期の段階で抽出される特徴は pre-attentive な特徴と呼ばれている。pre-attentive な特徴は、認識など意識的に行われる後段の高次処理の入力として本質的であり、明暗、色、明暗の勾配方向、テクスチャ要素などとともに、対称性が大きな役割を果たすことが知られている⁽¹⁰⁾。対称

†1 山形大学工学部情報科学科
Department of Informatics, Faculty of Engineering,
Yamagata University

†2 株式会社トヨタ自動車
Toyota Motor Corporation

†3 大阪電気通信大学総合情報学部情報工学科
Department of Engineering Informatics, Faculty
of Information Science and Arts, Osaka Electro-
Communication University

†4 東京大学大学院情報理工学システム情報学専攻
Information Physics and Computing, Graduate School
of Information Science and Technology, The University
of Tokyo

性は他の pre-attentive な特徴と異なり, ある程度広い範囲より抽出される特徴である. 数学的には対称性は, なんらかの変換に対する不変性のことであり, たとえば回転対称性は回転変換に対する不変性を意味する. 画像は 2 次元の濃淡分布であるから, 対称性を有する画像は 2 次元にランダムに濃淡が変化するのではなく, 対称性で表される秩序を持つ. このような観察に導かれ, 本稿では初期処理において抽出すべき特徴は, 局所的になんらかの対称性を有するという仮説をたてる. 後述のように, エッジやコーナや濃淡の極大点はこれに含まれる. この仮説に基づき, 新しいセンシング構造を有する特徴抽出原理を提案することが本稿の第 1 の目的である.

本稿の第 2 の目的は, このような局所的対称性を直接抽出する手法として, 固視微動型のセンシング構造を提案することである. 固視微動とは人が対象を凝視するときに見られる眼球の微小運動のことである. 固視微動を止めると人は視覚により知覚できなくなることが知られている. このことは固視微動が人の視覚にとって本質的な役割を演じていることを示している. 我々はこれまでに固視微動型イメージセンサによる画像特徴抽出法を提案してきた^{5),8),11)}. 従来の特徴抽出手法の多くは標準化され量子化された画像に演算を施すものであり, これらの過程での誤差や雑音の混入は避けられない¹⁾. しかし, 固視微動型イメージセンサでは, 微動により連続的な濃淡分布の特徴を連続的な時間軸に展開して抽出する. このため, 抽出される特徴量は離散化と量子化の影響を受けない.

以下, 局所的対称性に基づく画像特徴の仮説を述べ, 対称性を表現する座標系として局所 Log-Polar 座標系を導入する. 次に 2 つの軸の方向の濃淡変化を時間変調するための固視微動の方式と, それを復調するためのイメージセンサの構造について説明する. 最後にシミュレーションによる特徴抽出結果を示し, まとめて述べる.

2. 画像の局所の特徴と対称性

2.1 局所の特徴に関する仮説

序論で述べたように, 本稿では抽出すべき画像の局所の特徴に関して次の仮説を設ける.

仮説 濃淡分布の局所的な特徴は, 各位置を中心とした回転対称性およびスケール対称性の大小に一致する.

ここで回転対称性とは回転変換に対する不変性のことであり, スケール対称性とは拡大・縮小変換に対する不変性のことであり. たとえば図 1 に示されている

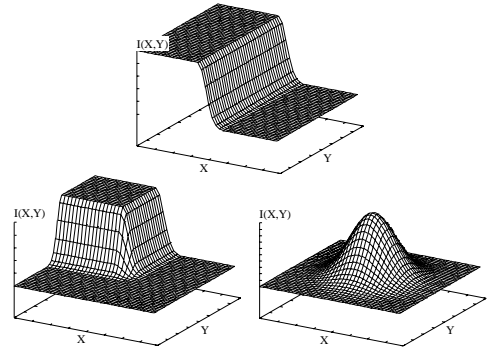


図 1 画像の代表的な局所の特徴. 横軸はそれぞれ x, y 軸, 縦軸は濃淡値を表す. 左からエッジ, コーナ, 極大点

Fig. 1 Examples of image feature points. The x - y plane corresponds to an image plane, and the z axis represents the image value. The edge, corner and the maximal point are shown.

エッジ上の点近辺においては, エッジ上の点を中心に拡大・縮小を行っても濃淡分布は変化しない. また濃淡の極大点の近辺においては, 極大点を中心として濃淡分布を回転させてもやはり濃淡分布は変化しない. このような対称性は, 濃淡分布を画像上の各点を中心とした Log-Polar 座標系を用いて簡明に記述することができる.

2.2 局所 Log-Polar 座標系

局所 Log-Polar 座標系 (ρ, θ) とは, 着目点 (x_0, y_0) からの相対的な位置 $(\Delta x, \Delta y)$ を動径方向成分 ρ と角度成分 θ を用いて表す座標系で, 直交座標系 (x, y) とは

$$\begin{cases} \rho = \log \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \\ \theta = \tan^{-1}(\Delta y / \Delta x) \end{cases} \quad (1)$$

ただし

$$\Delta x = x - x_0, \quad \Delta y = y - y_0 \quad (2)$$

の関係を持つ. 本稿では画像上の各点を中心とした限られた範囲の濃淡分布を Log-Polar 座標系で記述することにより, 各点における局所的な対称性を抽出する. Log-Polar 座標系により限られた範囲の濃淡分布を記述したものを局所 Log-Polar 画像と呼ぶ. ちなみに人の視覚系においては視野の中心から周辺へと離れるに従い指数的に分解能が低くなることが知られている. 局所 Log-Polar 画像の利用は, 人の視覚の持つこのような大局的な Log-Polar 構造を局所的にも持たせることを意味している.

2.3 局所的 Log-Polar 座標系による対称性の表現
着目している点 (x_0, y_0) を原点とする局所的 Log-Polar 画像を $I(\rho, \theta)$ と表す. 画像 $I(\rho, \theta)$ が局所的

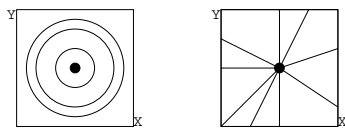


図 2 局所的回転対称性・スケール対称性を有する画像の等高線。各画像中央が着目点。回転対称な画像の等高線は同心円となり、スケール対称な画像の等高線は放射状となる

Fig. 2 Examples of level curves of the locally symmetrical images. Left: Rotational symmetry. Right: Scale symmetry. Rotational symmetric image has concentric circles as level curves, and scale symmetric image has radial lines as level curves.

転対称性を有するとき、 $I(\rho, \theta)$ は着目点中心の任意の角度の回転に対して不変であり、定数 Θ_0 を用いて

$$I(\rho, \theta) = R(\rho)\Theta_0 \quad (\text{回転対称性}), \quad (3)$$

と表される。一方スケール対称性を有するとき、 $I(\rho, \theta)$ は任意の倍率による拡大・縮小に対して不変であり、定数 R_0 を用いて

$$I(\rho, \theta) = R_0\Theta(\theta) \quad (\text{スケール対称性}) \quad (4)$$

のように表される。 $\Theta(\theta)$ は周期 2π の周期関数である。

式 (3) で表される画像の濃淡の等高線は、図 2 左に示すように着目する点 (x_0, y_0) を中心とする同心円となる。濃淡値の分布は着目点 (x_0, y_0) を端点とする半直線に沿って $R(\rho)$ で表される。等高線が着目点を中心とした同心円であるとき、着目点は濃淡の極大もしくは極小点であり、着目点を中心に濃淡は単峰状もしくはリング状に分布する。 ρ - θ 座標表現では図 3 下左に示すように ρ 軸方向にのみ濃淡の変化する縦縞状の画像となる。一方、式 (4) で表される画像の濃淡の等高線は、図 2 右に示すように着目点 (x_0, y_0) を端点とする複数の半直線となる。濃淡値の分布は着目点 (x_0, y_0) を中心とする円に沿って $\Theta(\theta)$ で表される。着目点を端点とする半直線が等高線であるとき、着目点は直線状のエッジもしくは角点や頂点などの直線状のエッジの交点となる。 ρ - θ 座標表現では図 3 下右に示すように θ 軸に沿ってのみ濃淡値が変化する横縞の画像となる。局所的に回転対称もしくはスケール対称な濃淡パターンの例を図 3 上に示す。

なお、実際の画像では、以上の仮説は特徴の空間的広がりと局所 Log-Polar 画像の広がりとの関係が適切な範囲にある前提のもとで成立すべきものとする。たとえば曲線状のエッジでもその曲率半径に比べて局所 Log-Polar 画像の広がり小さい範囲では直線状のエッジと見なすことができるため、抽出すべき特徴に含まれる。またたとえば尾根線も、尾根線の幅が局所画像の幅に比べて狭いときには回転対称な点と見なすことができる。

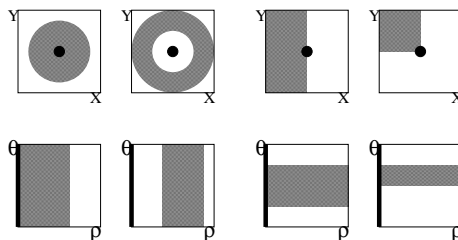


図 3 局所的対称性を有する Log-Polar 画像。上：画像 $I(x, y)$ 。画像中央の黒丸を原点とする。下：Log-Polar 画像 $I(\rho, \theta)$ 。左 2 つは回転対称性を有し、右 2 つがスケール対称性を有する。左端は濃淡の極大点に、右 2 つがそれぞれエッジおよびコーナに対応する

Fig. 3 Examples of locally symmetric log-polar images. Top: Locally symmetric images $I(x, y)$. Bottom: Corresponding log-polar images $I(\rho, \theta)$. Left two examples show locally rotation symmetric images, and right two scale symmetric ones.

特徴の空間的広がり特徴抽出に用いる画像の広がりとの関係が抽出される特徴に影響することは多重解像度解析の分野などでも指摘されていることであり⁷⁾、従来の特徴抽出演算子を用いても演算子の大きさに依存して抽出される特徴は変化する。特徴の空間的広がりについては 4 章において再度説明する。

3. 固視微動型イメージセンサ

3.1 固視微動型イメージセンサの原理

固視微動とは、人が対象を注視しているときに眼球に見られる不随意的微小運動のことである。固視微動を止めると人は対象を知覚することができなくなることが知られており、固視微動は視覚にとって本質的な役割を果たしていると考えられている。我々はこれまでに、この固視微動をモデルとしたイメージセンサを開発してきた。

一般にイメージセンサはレンズ系により外界の情景を撮像素子の並んだ撮像面上に結像させる。レンズ系による結像により、撮像面上には明暗の照度分布が与えられる。従来のイメージセンサにより得られる画像は、各受光素子それぞれの位置における照度を時間積分した値の配列であった。得られた画像より局所的な特徴を抽出するためには近接する画素間の濃淡値を比較し解析するしかなく、得られる特徴には空間的な離散化の影響が必ず含まれる。

一方固視微動型イメージセンサは、画像を取得する際に周期的に微動する。微動の周期 T はフレームレートより十分短くする。微動により各受光素子からの出力信号は周期 T で時間変化する。この時間変化する信号は、各受光素子近辺の照度分布を時間変調した

ものである。固視微動型イメージセンサにより得られる画像は、各受光素子からの時間変調信号をセンサ自身により画素ごとに復調して得られる値の配列である。微動のさせ方および復調のさせ方を適切に定めることにより、様々な画像特徴を直接抽出するセンサを設計することができる。

量子化された濃淡画像に差分演算を適用する従来手法と本質的に異なり、センサの微動による変調および復調により特徴を抽出するため、固視微動型イメージセンサにより抽出される特徴量は量子化の影響をいっさい受けない。

3.2 対称性抽出のための固視微動法

撮像面 $x-y$ 上における照度分布を $I(x, y)$ で表す。撮像面内で受光素子を周期 T で微動させる。静止しているときに位置 (x_0, y_0) にある受光素子について考え、この受光素子の時刻 t における位置を $(x(t), y(t))$ と表す。受光素子の位置を点 (x_0, y_0) の周りに局所的な Log-Polar 座標系 $(\rho(t), \theta(t))$ で表現する。

$$\begin{cases} \rho(t) = \log \sqrt{\Delta x^2(t) + \Delta y^2(t)} \\ \theta(t) = \tan^{-1}(\Delta y(t)/\Delta x(t)) \end{cases} \quad (5)$$

ただし $\Delta x(t) = x(t) - x_0$, $\Delta y(t) = y(t) - y_0$ であり、 $\rho(t)$, $\theta(t)$ はそれぞれ周期 T の周期関数である。

撮像面上の照度分布 $I(x, y)$ を点 (x_0, y_0) を原点とした Log-Polar 座標系で $I(\rho, \theta)$ と表現する。時刻 t における受光素子からの出力信号 $s(t)$ は位置 $(\rho(t), \theta(t))$ における照度に比例する。比例定数を c とおくと、

$$s(t) = c \cdot I(\rho(t), \theta(t)) \quad (6)$$

となる。以下の表式においては、見やすくするために $c = 1$ とする。

信号 $s(t)$ は周期 T の周期関数であり、フーリエ級数展開ができる。 $\omega_0 = 2\pi/T$ と表し、角周波数 $i\omega_0$ に対応するフーリエ係数を $\tilde{s}(i)$ で表す。ただし i は整数である。一般の照度分布 $I(\rho, \theta)$ のうち、式 (3), (4) で表される対称性を包含する照度分布として

$$I(\rho, \theta) = R(\rho)\Theta(\theta) \quad (7)$$

のように変数分離の形で表されるものを考える。このとき受光素子からの出力 $s(t)$ はセンサの微動により

$$s(t) = R(\rho(t))\Theta(\theta(t)) \quad (8)$$

となる。 $R(\rho(t))$, $\Theta(\theta(t))$ はいずれも周期 T の周期関数であり、基本角周波数 ω_0 でフーリエ級数展開できる。 $R(\rho(t))$ および $\Theta(\theta(t))$ のフーリエ係数をそれぞれ $\tilde{R}(i)$, $\tilde{\Theta}(i)$ と表すとき、式 (8) より得られる $s(t)$ のフーリエ係数 $\tilde{s}(i)$ は $\tilde{R}(i)$ と $\tilde{\Theta}(i)$ の畳み込みとなる。

$$\tilde{s}(i) = \tilde{R}(i) * \tilde{\Theta}(i). \quad (9)$$

ここで照度分布の半径方向成分 $R(\rho)$ と角度方向成分 $\Theta(\theta)$ とを異なる周波数成分へと変調するために、 $\rho(t)$ と $\theta(t)$ の周期をそれぞれ T/M および T/N とする。

$$\rho(t) = \rho(t + T/M), \quad \theta(t) = \theta(t + T/N). \quad (10)$$

ただし M, N は互いに素な自然数であり、受光素子の周期は T のままである。このとき、 $\omega_\rho = M\omega_0$, $\omega_\theta = N\omega_0$ と表すと $\tilde{R}(i)$ は ω_ρ の高調波成分のみを、 $\tilde{\Theta}(i)$ は ω_θ の高調波成分のみを持つようになる。すなわち、

$$\begin{cases} \tilde{R}(i) = 0 & (\text{if } i \bmod M \neq 0), \\ \tilde{\Theta}(i) = 0 & (\text{if } i \bmod N \neq 0). \end{cases} \quad (11)$$

式 (3) で示したように、照度分布が着目点 (x_0, y_0) の周囲において局所的回転対称性を有するとき、 $\Theta(\theta) = \Theta_0$ より

$$\tilde{\Theta}(i) = \begin{cases} \Theta_0 & (i = 0), \\ 0 & (\text{otherwise}), \end{cases} \quad (12)$$

であるから

$$\tilde{s}(i) = \tilde{R}(i) * \tilde{\Theta}(i) = \Theta_0 \tilde{R}(i) \quad (\text{回転対称}) \quad (13)$$

が成り立つ。受光素子の出力信号のスペクトルは $\omega_\rho = M\omega_0$ の高調波成分のみを持つことが分かる。一方、式 (4) で示したようにスケール対称性を有するときには

$$\tilde{R}(i) = \begin{cases} R_0 & (i = 0), \\ 0 & (\text{otherwise}), \end{cases} \quad (14)$$

であるから

$$\tilde{s}(i) = \tilde{R}(i) * \tilde{\Theta}(i) = R_0 \tilde{\Theta}(i) \quad (\text{スケール対称}) \quad (15)$$

が成り立つ。出力信号のスペクトルは $\omega_\theta = N\omega_0$ の高調波成分のみを持つ。半径方向と角度方向に異なる周波数で受光素子を微動させることにより、回転対称性とスケール対称性とをそれぞれ異なる周波数成分へと変調できることが分かる。そのような微動のさせ方として、本稿では次のような微動を提案する。

$$\begin{cases} \rho(t) = r_o + r \cos(\omega_\rho t) \\ \theta(t) = \omega_\theta t. \end{cases} \quad (16)$$

ただし r_o, r は定数である。式 (16) に従う受光素子の軌道の例を図 4 に示す。式 (16) は半径方向に角周波数 ω_ρ で振動し、角度方向には等角速度 ω_θ で回転する軌跡を表す。Log-Polar 画像においては、この軌跡は

$$\rho = r_o + r \cos\left(\frac{\omega_\rho}{\omega_\theta} \theta\right) \quad (17)$$

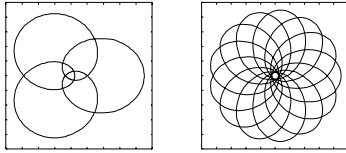


図4 受光素子の軌道の例. 左: $M = 3, N = 4$. 右: $M = 13, N = 11$

Fig. 4 Examples of the orbit of a photo detector. Left: $M = 3, N = 4$. Right: $M = 13, N = 11$.

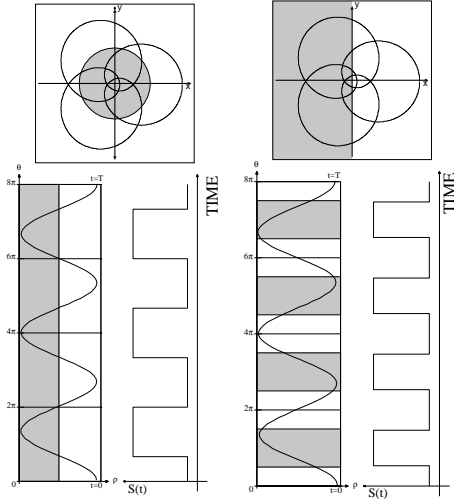


図5 $M = 3, N = 4$ のときの対称性の変調の様子. 左: 回転対称な特徴. 右: スケール対称な特徴. 上: $x-y$ 面における受光素子の軌跡. 下: Log-Polar 画像における受光素子の軌跡と対応する出力信号 $s(t)$ のグラフ. Log-Polar 画像の横軸は ρ , 縦軸は θ . 受光素子が $N = 4$ 回転するため $0 \leq \theta \leq 8\pi$ について表示してある. 信号 $s(t)$ は, 回転対称なときには周期 T/M , スケール対称なときには周期 T/N の周期信号になる

Fig. 5 The modulation of the local symmetry. Left: Rotational symmetry. Right: Scale symmetry. Top: The orbit of a photo detector on the image plane $x-y$. Bottom: The orbit on the log-polar image plane $\rho-\theta$, and the corresponding output signal $s(t)$. The period of $s(t)$ is T/M and T/N , respectively.

で表される. それぞれの対称性が異なる周波数へと変調される様子を図5に示す.

3.3 対称性の抽出

上で述べたとおり, 受光素子を半径方向と角度方向とに異なる周波数で微動させるとき, 回転対称性とスケール対称性とがそれぞれ $\omega_\rho = M\omega_0$ および $\omega_\theta = N\omega_0$ の高調波成分へと変調される. そこで局所的対称性の抽出は, 信号 $s(t)$ のスペクトルに占める角周波数 ω_ρ もしくは ω_θ の高調波成分が占める割合を求めることにより行う. ただし信号 $s(t)$ のバイアス成分 $s_0 = 1/T \int_0^T s(t) dt$ は濃淡分布の対称性の有無

には影響を与えず, 単に受光素子近辺が明るい暗いかを示す量である. そこで局所的対称性の抽出は, バイアス成分を取り除いたうえで行う. 具体的には回転対称性の評価量 P_{rot} とスケール対称性の評価量 P_{scl} を次式のように定義する.

$$P_{\text{rot}} = \frac{\sum_{i \neq 0} \|\tilde{s}(Mi)\|^2}{E} \quad (18)$$

$$P_{\text{scl}} = \frac{\sum_{i \neq 0} \|\tilde{s}(Ni)\|^2}{E} \quad (19)$$

ただし E は信号 $s(t)$ のパワーよりバイアス成分を引いた値である.

$$E = \sum_{i \neq 0} \|\tilde{s}(i)\|^2 \quad (20)$$

これら評価量は $0 \leq P_{\text{rot}}, P_{\text{scl}} \leq 1$ を満たし, 最大値1をとるのはそれぞれ局所的な対称性を有するときのみである. これら特徴量が全エネルギー E により正規化されていることは, 本提案手法が持つ有用な性質の1つである.

3.4 センサの微動速度について

受光素子の出力信号 $s(t)$ のフーリエ係数は次式のようにして算出できる.

$$\tilde{s}(i) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) \exp(-j\omega_0 t) dt \quad (21)$$

撮像面 $x-y$ における受光素子の軌道を C で表し, 軌道 C に沿った長さを表すパラメータ $u = u(t)$ をとり $u(0) = 0$ とおく. 時刻 t における受光素子の位置を $(x(t), y(t))$ とおくと

$$u(t) = \int_0^t \|\mathbf{v}(t)\| dt \quad (22)$$

が成り立つ. ただし

$$\mathbf{v}(t) = (\dot{x}(t), \dot{y}(t)) = (\partial x / \partial t, \partial y / \partial t)$$

は受光素子の微動速度であり, $\|\mathbf{v}(t)\| > 0$ と仮定する. 微動を表す式(16)はこの仮定を満している. $\|\mathbf{v}\| > 0$ であるとき関数 $u = u(t)$ は t に対して単調増加となり逆関数 u^- が存在する.

式(21)右辺を変数変換することで次式を得る.

$$\begin{aligned} & 1/T \int_0^T s(t) \exp(-j\omega_0 t) dt \\ &= 1/T \int_0^T I(x(t), y(t)) \exp(-j\omega_0 t) dt \quad (23) \\ &= 1/T \int_C I(u) \frac{\exp(-j\omega_0 u^-)}{\|\mathbf{v}(u^-)\|} du \end{aligned}$$

たとえば受光素子の速さが一定 $\|\mathbf{v}(t)\| = v_0$ であるときには $u = v_0 t$, $u^- = u/v_0$ であり, 式(21)は

$$\tilde{s}(i) = \frac{1}{T} \int_C \frac{I(u)}{v_0} \exp(-ji \frac{\omega_0}{v_0} u) du \quad (24)$$

となる. 出力信号 $s(t)$ の時間周波数 $i\omega_0$ 成分は空間周波数 $i\omega_0/v_0$ に対応しており, 照度分布は $I(u)/v_0$

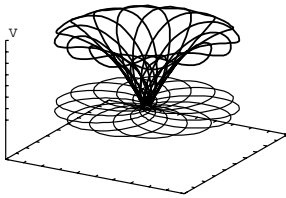


図6 受光素子の速度 $(x, y, ||v(x, y)||)$ を空間にプロットしたもの

Fig. 6 The velocity of the photo detector.

へと変換されている．出力信号の時間周波数 $i\omega_0$ 成分は，受光素子の微動の速さが速いほどより低い空間周波数に対応すること，いい換えると同一の空間周波数成分は微動の速さが速いほどより高い時間周波数成分へと変調されることが分かる．Log-Polar 座標系に基づきセンサを微動させるとき，受光素子の速度 $v(t) = (\dot{x}(t), \dot{y}(t))$ は

$$v(t) = e^{\rho} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\rho}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

となり，右辺 e^{ρ} の項の影響で着目点より離れるに従い微動の速さが速くなる傾向がある．式 (16) に従い微動する受光素子の，軌道上の各位置における速さを図6に示す．着目点近辺では遅く，周縁で速く動いていることが分かる．このとき照度分布の各空間周波数成分は，着目点の近辺に比べて周縁においてより高い時間周波数成分へと変調される．センサの応答が帯域制限されている場合，周縁における照度の変化はより高周波成分へと変調されるため抑圧され，着目点近辺の照度分布がより詳細に観測される．

上に見たように受光素子の軌道が同一であっても，微動の速度 v に依存して出力信号 $s(t)$ も異なったものになる．しかし前節で述べた対称性の評価量は，速度 $v(t)$ の変化による信号の変化には影響を受けない．なぜなら $\rho(t) = \rho(t+T/M)$ ， $\theta(t) = \theta(t+T/N)$ (式 (10)) が成立しているのなら，関数 $\rho(t)$ ， $\theta(t)$ の形にかかわらず $R(\rho(t)) = R(\rho(t+T/M))$ および $\Theta(\theta(t)) = \Theta(\theta(t+T/N))$ が成立し，提案手法はこれら $R(\rho(t))$ ， $\Theta(\theta(t))$ の周期性のみを利用して対称性を抽出しているからである．

3.5 センサによる復調法

出力信号 $s(t)$ より，式 (18)，(19) で与えられる特徴量を各受光素子ごとに復調するセンサについて述べる．信号 $s(t)$ よりバイアス成分を除いたパワー E は，次式により得ることができる．

$$E = \int_0^T ||s(t) - s_o||^2 dt \quad (26)$$

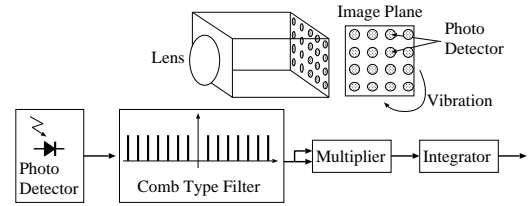


図7 局所的対称性を復調するセンサの基本構成図．撮像面もしくは像を微動させる．各受光素子の後ろを上記のように構成する．右端の積分器からの出力が式 (27) もしくは式 (28) の値となる． P_{rot} と P_{scl} の双方を計測するためには歯の間隔の異なる2種類のくし型フィルタを用意する

Fig. 7 The structure after a photo detector of the proposed image sensor. The output signal represents the value of Eq.(27) or (28). Two different comb type filters are needed for each pixel to obtain P_{rot} and P_{scl} .

また式 (18)，(19) の右辺分子は基本角周波数 ω_{ρ} もしくは ω_{θ} のくし型フィルタの出力であり，パーシバルの定理より次式が成り立つ．

$$\sum_{i \neq 0} ||\tilde{s}(Mi)||^2 = \int_0^T \left| \left| \sum_{i=0}^M [s(t - i\frac{2\pi}{\omega_{\rho}}) - s_o] \right|^2 \right| dt, \quad (27)$$

$$\sum_{i \neq 0} ||\tilde{s}(Ni)||^2 = \int_0^T \left| \left| \sum_{i=0}^N [s(t - i\frac{2\pi}{\omega_{\theta}}) - s_o] \right|^2 \right| dt. \quad (28)$$

信号 $s(t)$ からバイアス成分を除去したものを入力とし，時間 T の間 $2\pi/\omega_{\rho} = T/M$ もしくは $2\pi/\omega_{\theta} = T/N$ の遅延信号を正帰還することでくし型フィルタを実現できる．このくし型フィルタの出力を二乗し積分することで式 (27)，(28) の演算を実現できる．式 (27) および (28) それぞれの右辺を求めるセンサは図7のような構成になる．積分器の出力は，くし型フィルタの基本周波数が $M\omega_0$ のときに式 (18) の値となり， $N\omega_0$ のときに式 (19) の値となる．

以上述べてきた局所的対称性の抽出手順をまとめると次のようになる．

- (1) 式 (16) に従うようセンサを微動させる．
- (2) センサ自身により各画素ごとに下記の値を抽出する．センサの各画素には図7の構成を持つ回路を利用する．

$$E = \sum_{i \neq 0} ||\tilde{s}(i)||^2, \quad (29)$$

$$E_{\rho} = \sum_{i \neq 0} ||\tilde{s}(Mi)||^2, \quad (30)$$

$$E_{\theta} = \sum_{i \neq 0} ||\tilde{s}(Ni)||^2. \quad (31)$$

- (3) 回転対称性 $P_{rot} = E_{\rho}/E$ およびスケール対称性 $P_{scl} = E_{\theta}/E$ を求める．

4. シミュレーション実験

濃淡画像 $I(x, y)$ を与え, 画像上の各点 (x_o, y_o) について次式で与えられる画像上の n 点をサンプルする.

$$\begin{cases} x(i) = x_o + \exp(\rho(t_i)) \cos(\theta(t_i)) \\ y(i) = y_o + \exp(\rho(t_i)) \sin(\theta(t_i)) \end{cases} \quad (32)$$

ただし $t_i = i \cdot \Delta t$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$) は時刻を表すパラメータであり, $\rho(t_i)$ および $\theta(t_i)$ は次式を満たす.

$$\begin{cases} \rho(t_i) = r_o + r \cos(M\omega_o t_i) \\ \theta(t_i) = N\omega_o t_i. \end{cases} \quad (33)$$

画素値の系列 $s(i) = I(x(i), y(i))$ をフーリエ級数展開し, その係数をもとに位置 (x_o, y_o) における対称性の特徴量 P_{rot} と P_{scl} を求める. それぞれの特徴量の値が大きいほどその位置における局所的な回転対称性もしくはスケール対称性が高いことを示す. シミュレーションにあたっては受光素子の軌道に関するパラメータを定める必要がある. このうち M と N の値については, 幾通りかの組合せで実験を行ったところ, 互いに似通った値であれば特徴抽出結果にはほとんど影響を与えないことが分かった. しかし, たとえば $M = 101, N = 3$ のように値が大きく異なるときには特徴抽出の能力が低くなる傾向があった. 本稿には $M = 13, N = 11$ のときの実験結果を示す. 一方, 軌道の半径は抽出される特徴と密接に関係する. 軌道半径と特徴の大きさについては実験とあわせて説明する.

まず図 8 に濃淡の極大点における局所画像, その周辺での受光素子の軌跡, 出力信号 $s(t)$, およびそのスペクトル分布を示す. 極大点の局所画像には着目点を原点とするガウス分布を用い, 受光素子の軌跡の半径はガウス分布の標準偏差の倍となるよう設定した. 極大点は局所的に回転対称である. 図に示すように出力信号 $s(t)$ の周期が $T/M = T/13$ となっていることが分かる. スペクトル分布は $\omega_\rho = 13\omega_0$ の高調波成分のみが現れている. このため回転対称性は $P_{\text{rot}} = 1.0$ となり, スケール対称性は $P_{\text{scl}} = 0.0$ であった.

次にステップ状のエッジを対象としたシミュレーション結果を図 9 に示す. 図に示すように出力信号 $s(t)$ の周期が $T/N = T/11$ となっていることが分かる. スペクトル分布はほぼ $\omega_\theta = 11\omega_0$ の高調波成分のみが現れている. 高調波以外の成分が現れたのはシミュレーションの際に受光素子の軌道をサンプリングしたためである. 空間的に連続な濃淡分布を連続に移動し

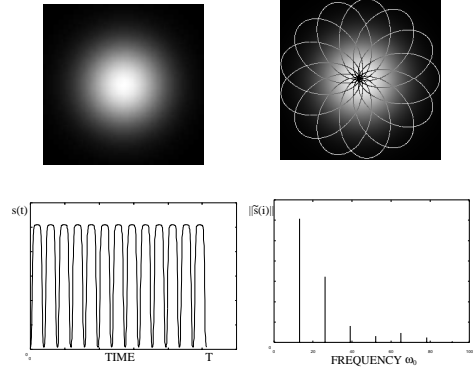


図 8 極大点におけるシミュレーション結果. 左上: 照度分布. 右上: 受光素子の軌跡. 左下: 出力信号 $s(t)$. 右下: スペクトル分布 $\tilde{s}(i)$

Fig. 8 Simulation result for a synthetic image. Top left: Original image. Top right: Orbit of the photo detector. Bottom left: Output signal $s(t)$. Bottom right: Spectrum $\tilde{s}(i)$.

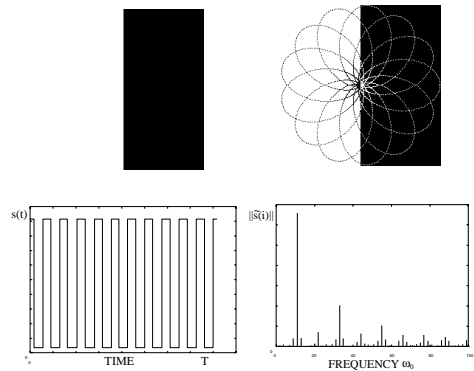


図 9 エッジ上の点におけるシミュレーション結果. 左上: 照度分布. 右上: 受光素子の軌跡. 左下: 出力信号 $s(t)$. 右下: スペクトル分布 $\tilde{s}(i)$

Fig. 9 Simulation result for a synthetic image. Top left: Original image. Top right: Orbit of the photo detector. Bottom left: Output signal $s(t)$. Bottom right: Spectrum $\tilde{s}(i)$.

て観測すれば, ステップエッジは厳密な意味でスケール対称性を有するため, $\tilde{s}(i)$ は $N\omega_0 = 11\omega_0$ の高調波成分のみを持つようになる. シミュレーションの結果スケール対称性は $P_{\text{scl}} = 0.99$ となり, 回転対称性は $P_{\text{rot}} = 0.06$ となった.

ところで現実には受光素子の大きさは有限であり結像系の解像度にも限界がある. このため観測される濃淡分布が厳密なステップエッジとなることはありえない. 濃淡分布におけるエッジは必ずある程度平滑化されている. ステップエッジは厳密なスケール対称性を有するが, 平滑化されたエッジは厳密にはスケール対称ではない. 2.3 節でも述べたとおり, 本稿で提案

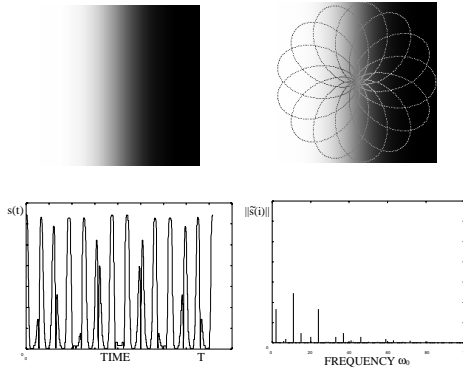


図 10 エッジ上の点におけるシミュレーション結果．ステップエッジを軌道半径の $1/4$ 程度平滑化したもの．左上：照度分布．右上：受光素子の軌跡．左下：出力信号 $s(t)$ ．右下：スペクトル分布 $\bar{s}(i)$

Fig. 10 Simulation result for a smoothed edge image. Top left: Original image. Top right: Orbit of the photo detector. Bottom left: Output signal $s(t)$. Bottom right: Spectrum $\bar{s}(i)$.

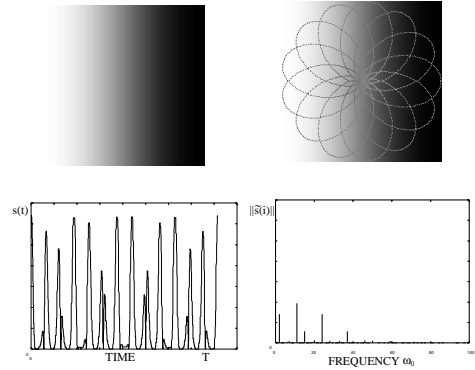


図 11 エッジ上の点におけるシミュレーション結果．ステップエッジを軌道半径の $1/2$ 程度平滑化したもの．左上：照度分布．右上：受光素子の軌跡．左下：出力信号 $s(t)$ ．右下：スペクトル分布 $\bar{s}(i)$

Fig. 11 Simulation result for a strongly smoothed edge image. Top left: Original image. Top right: Orbit of the photo detector. Bottom left: Output signal $s(t)$. Bottom right: Spectrum $\bar{s}(i)$.

する特徴に関する仮説は、特徴の空間的広がりと局所 Log-Polar 画像の広がりとの関係が適切な範囲にあることを前提としている．しかしこの適切な範囲が極端に狭いときには工学的に有用な仮説とはならない．エッジの例で具体的にいい換えれば、受光素子の軌道の大きさに比べてきわめて小さな平滑化により、抽出される対称度が極端に小さくなってはならない．

これらのことを検証するためにステップエッジをガウス関数を核として平滑化し、シミュレーションを行った．図 10 と図 11 に結果を示す．図 10 はガウス関数の標準偏差が軌道半径の約 $1/4$ のときの結果、図 11 は約 $1/2$ のときの結果である．出力信号 $s(t)$ を見ると平滑化により周期性が失われていることが分かる．しかしスペクトル分布 $\bar{s}(i)$ を見ると、ほぼ $N\omega_0$ の高調波成分のみを有している．具体的には標準偏差が軌道の $1/4$ のとき $P_{scl} = 0.71$, $P_{rot} = 0.00$ であり、 $1/2$ のときには $P_{scl} = 0.67$, $P_{rot} = 0.00$ であった．軌道半径の $1/2$ 程度まで平滑化されても、エッジは比較的高いスケール対称性を有していることが分かる．なお平滑化によりシミュレーションの際の空間的離散化の影響が低減され、回転対称度の値 P_{rot} はほぼ 0 となった．

次に図 12 に一般画像をもとにしたシミュレーション結果を示す．画像のサイズは 388×412 であり、軌道半径は 15 とした．画像の各位置において特徴量 P_{rot} および P_{scl} を算出し、濃淡値により特徴量の大きさを示した．明るい点ほど特徴量の大きさが大きいことを示す．図 12 上が元画像であり、下左が局所的回転

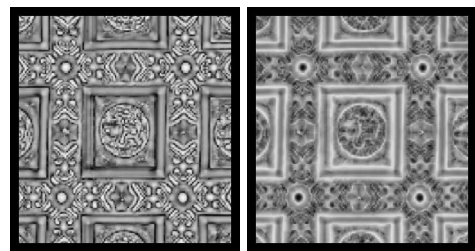
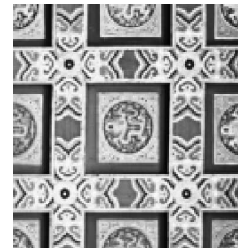


図 12 シミュレーション結果．上：照度分布．下左：局所的回転対称性抽出結果．下右：局所的スケール対称性抽出結果．画像周囲の黒枠の幅は軌道半径の 15 pixel である

Fig. 12 Simulation result. Top: The original image. Bottom left: Local rotation symmetry P_{rot} . Bottom right: Local scale symmetry P_{scl} .

対称性 P_{rot} を、下右がスケール対称性 P_{scl} を示す．回転対象な点として極大・極小点や尾根線が、スケール対象な点としてエッジやコーナが抽出されている．

文字画像を用いたシミュレーション結果を図 13 に示す．軌道の半径がほぼ文字のストローク幅と一致するような条件でシミュレーションを行った．図 13 上が元画像であり、下左が各位置における回転対称性、

解

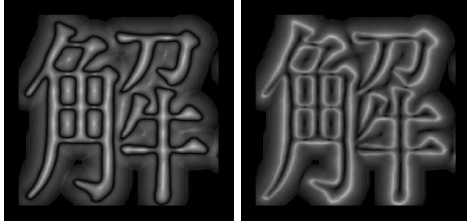


図 13 シミュレーション結果．上：照度分布．下左：局所的回転対称性抽出結果．下右：局所的スケール対称性抽出結果
 Fig. 13 Simulation result. Top: The original image. Bottom left: Local rotation symmetry P_{rot} . Bottom right: Local scale symmetry P_{scl} .

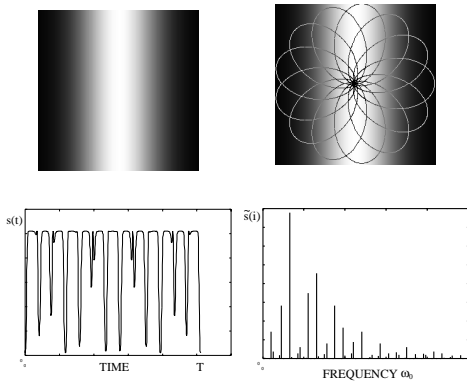


図 14 尾根線上の点におけるシミュレーション結果．左上：照度分布．右上：受光素子の軌跡．左下：出力信号 $s(t)$ ．右下：スペクトル分布 $\tilde{s}(i)$
 Fig. 14 Simulation result for a synthetic image. Top left: Original image. Top right: Orbit of the photo detector. Bottom left: Output signal $s(t)$. Bottom right: Spectrum $\tilde{s}(i)$.

下右がスケール対称性示す．厳密にはスケール対称ではない曲線においてもエッジが抽出されている．また局所的に回転対称な点として尾根線の交点や尾根線が抽出されている．これらの点は回転対称ではないが，軌道の大きさ程度の平滑化が行われ，ストローク中央にごく滑らかな尾根線が生じ，ストロークの交点に濃淡値の極小点が生じたものと考えられることができる．

最後に尾根線上の点に着目したシミュレーション結果を図 14 に示す． x 軸に沿った照度分布はガウス分布であり，その標準偏差の倍を軌道の半径とした．図 14 左下に示したように，出力信号 $s(t)$ がほぼ $T/N = T/11$ の周期関数となっており，結果スペクトルは ω_θ の高調

波成分を多く含んでいる．回転対称性は $P_{rot} = 0.68$ ，スケール対称性は $P_{scl} = 0.11$ であった．幅を持つ尾根線は厳密には Log-Polar 対称ではないにもかかわらず，比較的強い回転対称性を有していることが分かる．

これらの実験は，2.1 節で述べた仮説に基づいた特徴量の抽出結果である．シミュレーション結果によれば，従来の画像の初期処理において抽出されていたエッジやコーナ，尾根線などを含む特徴的な点が抽出されている．本章で示した結果は，本稿で述べた特徴量に関する仮説が妥当であることを示すものであると考える．

5. 結 論

本稿では画像の初期処理として抽出すべき特徴として，局所的な対称性に関する仮説をたてた．対称性として回転対称性とスケール対称性を考え，回転対称な点が濃淡の極大・極小点やリングの中心点などに対応し，スケール対称な点がエッジやコーナに対応することを示した．

局所的な対称性を抽出するために，画像の局所的な Log-Polar 画像を導入した．局所的 Log-Polar 画像によると回転対称な点では半径 ρ 軸に沿って濃淡値が一定な横縞が，スケール対称な点では角度 θ 軸に沿って一定な縦縞の濃淡分布が得られることを示した．

次に固視微動型イメージセンサを利用して，局所的対称性を直接抽出する手法を提案した．固視微動型イメージセンサは，センサを微動させることにより濃淡分布を時間変調する．そしてセンサ自身により特徴量を復調し出力する．提案手法においては，半径方向と角度方向の濃淡変化をそれぞれ異なる周波数信号へと変調するために，センサを半径方向と角度方向とに異なる周波数で微動させる．このとき受光素子からの信号を，それぞれの周波数に対応するくし型フィルタに通すことで，回転対称性およびスケール対称性を抽出できることを示した．また，くし型フィルタを実現する回路構成についても説明した．

最後に，仮説に基づく局所の特徴を固視微動型イメージセンサで抽出するシミュレーション実験を行った．実験によると本提案手法により，従来のエッジなどを含む特徴的な点を抽出できることができた．このことは特徴に関する仮説が妥当であったことを示していると考えられる．

固視微動型イメージセンサは，センサの動きにより濃淡分布の構造を変調するものである．従来の量子化された画像に演算子を適用する手法と本質的に異なり，量子化の影響をいっさい受けることなく特徴量を抽出

することができる。また提案した特徴量は正規化されているため量の比較が容易にできるうえに、リアルタイムで抽出される。これらのことは汎用な画像認識システムを構築するうえで有用な性質であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Ando, S.: Consistent Gradient Operators, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.3, pp.252-265 (2000).
- 2) Bell, A.J. and Sejnowski, T.J.: Edges are the 'Independent Components' of Natural Scenes, *Advances in Neural Information*, Vol.9, pp.1061-1067 (1997).
- 3) Berzins, V.: Accuracy of Laplacian Edge Detectors, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol.27, No.2, pp.195-210 (1984).
- 4) Canny, J.: A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.8, No.6, pp.679-698 (1986).
- 5) Kimachi, A., Imaizumi, R. and Ando, S.: Intelligent Image Sensor with a Vibrating Mirror Mimicking Involuntary Eye Movement, *Proc. 16th Sensor Symposium*, pp.171-176 (1998).
- 6) Koplowitz, L. and Greco, V.: On the Edge Location Error for Local Maximum and Zero-Crossing Edge Detectors, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, No.12, pp.1207-1212 (1994).
- 7) Lindeberg, T.: Scale-Space for Discrete Signals, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.12, No.3, pp.234-254 (1990).
- 8) Sakaguchi, T., Nakamura, T. and Ando, S.: Ultrafast correlation image sensor: Fabrication and experiments with 8×8 pixels model, *Tech. Digest of 15th Sensor Symp.*, Kawasaki, Japan, pp.111-114 (1997).
- 9) Thompson, W. and Yonas, A.: What Should be Computed In Low Level Vision Systems, *AAAI-80*, pp.7-10 (1980).
- 10) Tyler, C. (Ed.): *Human Symmetry Perception and Its Computational Analysis*, VSP (1996).
- 11) 本谷秀堅, 来海 暁, 安藤 繁: 固視微動型イメージセンサとその応用, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, Vol.99-CVIM-118, pp.9-16 (1999).
- 12) デビッド・マー(著), 安藤広志, 乾 敏郎(訳): ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現, 産業図書(1987).

(平成 12 年 10 月 4 日受付)

(平成 14 年 4 月 16 日採録)



本谷 秀堅(正会員)

1991 年東京大学工学部計数工学科卒業。1993 年同大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年株式会社東芝入社。1996 年より東京大学助手, 2000 年より山形大学工学部助教授, 現在に至る。形状記述, 画像認識等の研究と教育に従事。計測自動制御学会, 電気学会, IEEE 等の会員。



柴田 潤

1977 年生まれ。2000 年東京大学工学部計数工学科卒業。2002 年同大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年株式会社トヨタ自動車入社, 現在に至る。



来海 暁

1993 年 3 月東京大学工学部計数工学科卒業。1999 年 3 月同大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。博士(工学)。1999 年より東京大学工学部計数工学科助手, 2001 年より大阪電気通信大学総合情報学部情報工学科講師, 現在に至る。画像計測, 画像処理, 視覚センサ, 集積回路等の研究と教育に従事。計測自動制御学会, 電気学会, 電子情報通信学会, IEEE, OSA 等の会員。



安藤 繁

1974 年東京大学工学部計数工学科卒業。1979 年同大学院博士課程修了。工学博士。1979 年より同大学助手, 1980 年より講師, 1984 年より電気通信大学助教授, 1987 年より東京大学工学部助教授, 1996 年より同教授, 2001 年より同大学院情報理工学系研究科教授, 現在に至る。センサ, 画像処理, 信号処理, 光および音響計測, 電子回路等の研究と教育に従事。昭和 53 年, 昭和 62 年, 平成 5 年, 平成 9 年計測自動制御学会論文賞友田賞, 平成 13 年同著述賞, 平成 14 年日本音響学会佐藤論文賞受賞。