

固視微動型イメージセンサとその応用

本谷 秀堅 来海 暁 安藤 繁

東京大学大学院
工学系研究科

我々の研究室では、画像の特徴量を直接計測することのできる固視微動型イメージセンサを開発している。固視微動型イメージセンサとは、画像を取得する際に微動することにより画像特徴を時間変調し、微動と同期した参照信号による復調により画像特徴を直接計測するセンサである。画像特徴をセンサの微動により変調しているため、量子化誤差を含むことなく特徴量を計測することができる。また参照信号と無相関なノイズ成分も除去することができる。本稿では、センサを円運動させ、参照信号に三角関数を用いることにより、本センサが画像の微係数を直接計測できることを示す。試作した固視微動型イメージセンサを用いた実験およびシミュレーション実験により、本手法が直接画像微係数を計測できることを確認した。

On Vibratory Feature Extraction Scheme for Correlation Image Sensor

Hidekata Hontani Akira Kimachi Shigeru Ando

Graduate School of Engineering
University of Tokyo

Our laboratory is developing a *correlation image sensor* which obtains time-domain correlation between an output signal of a photo-detector of the sensor and a reference signal. We proposed a feature extraction method which uses this correlation image sensor. The proposed method modulates the image features by vibrating the image, and demodulates the features with reference signals which synchronized with the sensor vibration. This method extracts image features free from quantized error and from noise which has no correlation with the reference signal. In this paper, we propose a method to extract differential coefficients by vibrating the image circularly and demodulating with trigonometric functions. Experimental results show that the proposed method detects differential coefficients successfully.

1 はじめに

画像認識システムにとって、画像の濃淡勾配やエッジ、角点など画像中の特徴を精度良く求めることは極めて重要である。しかし、これまでに数多く提案されてきた手法のほとんどは、予め取得された画像データ配列を対象としていた。それらにおいては、標準化の影響や画素雑音を軽減することが重要な課題となっている。

一方、画像の取得段階に戻って考えると、レンズ系が外界の情景をセンサの撮像面に結像させる。レンズ系により結ばれた像は、撮像面上の照度分布を与える。画像の濃淡勾配やエッジなど画像中の特徴とは、本来、この撮像面上の照度分布にみられる局所的な構造のことである。従来のイメージセンサは、撮像面上に配置された受光素子により撮像面上の照度分布を時間積分し、離散的な画像データ配列を出力する。このような画像データ配列から局所的な構造を抽出するには、複数の画素の関係を解析する以外の方法はない。

これに対し、本稿で前提とするのは、画像取得の段階でこれらの局所的構造を直接計測することのできる固視微動型イメージセンサである [3, 4, 5]。固視微動とは人が視覚により対象を凝視するとき、眼球にみられる無意識の微少運動のことである。センサをフレーム間隔より十分短い周期 T で微動させると、受光素子上の照度は周期 T で変動するようになる。これによって生じる周期 T の光電流は、受光素子の位置近傍における照度分布の構造を反映している。言い換えると、各受光素子の光電流は、画素近傍の照度分布の構造のセンサの微動による変調信号である。固視微動型イメージセンサでは、現在開発を進めている時間相関イメージセンサ [1, 2, 6] を用いることにより、この光電流をセンサの動きと同期した参照信号により復調して出力する (図 1)。この方式は、1) 微動による各受光素子の軌道は連続な曲線であり、空間的標準化の影響をうけることなく画像の局所の特徴量が求められる、2) 参照信号と無相関な雑音成分を除去して特徴量が求められる、3) プロセッサを必要としない実時間処理である等、従来の方式とは本質的に異なる利点を有する。

本稿の目的は、この固視微動型イメージセンサに対する理論的な定式化を与え、シミュレーションと実機実験により確認することである。すなわち、固視微動型センシングにおいては、センサの微動のさせ方と参照信号の与え方に多大な自由度がある。また、センサ微動の軌道は、画素間隔に対し十分に大きくも小さく

もすることができる。以下では、任意の軌道と参照信号に対するセンサ出力の一般的な形式を与えた後、実現の容易な円軌道と螺旋軌道 (同心円軌道) を仮定することにより、従来の微分特徴量と同等の特徴量が得られることを示し、実験により確認する。なお、本方式の基本デバイスである時間相関イメージセンサについては、付録に概要を示した。

2 固視微動型イメージセンサ

2.1 基本原理：センサ振動と相関検出

センサが周期 T で微動しているとき、位置 (x, y) の受光素子からの出力を $f(x, y; t)$ で表す。信号 $f(x, y; t)$ は、受光素子の軌道に沿った照度分布を表す信号 $s(x, y; t)$ と、熱雑音などのノイズ成分 $n(x, y; t)$ の和であるとする。

$$f(x, y; t) = s(x, y; t) + n(x, y; t) \quad (1)$$

例えばセンサを周期 T で円運動させることを考える。このとき、図 2 上に示すように、受光素子の軌道が明暗の境界 (エッジ) をまたいでいる場合には、信号 $s(x, y; t)$ は同図下に示すような周期 T で振動する信号となる。エッジの方向が変化すると、信号 $s(x, y; t)$ の位相が変化する。

次いで各位置における照度分布を復調するために、参照信号との時間相関を求める。参照信号は全画素共通とし、必要ならば複数の参照信号を用意する。第 i 番目の参照信号を $r_i(t)$ と表すとき、信号 $f(x, y; t)$ と $r_i(t)$ との時間相関は式 (2) で表される。参照信号 $r_i(t)$ とノイズ成分 $n(x, y; t)$ とは無相関であるから、このときノイズ成分を除去できることが分かる。

$$\begin{aligned} I_i(x, y) &= \int_0^T f(x, y; t) r_i(t) dt \\ &= \int_0^T (s(x, y; t) + n(x, y; t)) r_i(t) dt \quad (2) \\ &= \int_0^T s(x, y; t) r_i(t) dt \end{aligned}$$

参照信号 $r_i(t)$ は、画像認識に有用な特徴が復調されるように選ぶ。ここでは、参照信号として直交する二つの信号 $r_0(t) = \cos(2\pi t/T)$ および $r_1(t) = \sin(2\pi t/T)$ を用いた例を示す。図 2 に示した二つの出力信号のうち、左に示した信号は $r_0(t)$ と大きな相関を持つが $r_1(t)$ とはほとんど相関を持たない。一方右に示した信号は、 $r_0(t)$ とはほとんど相関を持たないが $r_1(t)$ とは大きな相関を持つ。後で示すように、 $s(x, y; t)$ と $r_0(t)$ との相関は x による偏微分、 $r_1(x, y; t)$ との相関は y による偏微分となる。

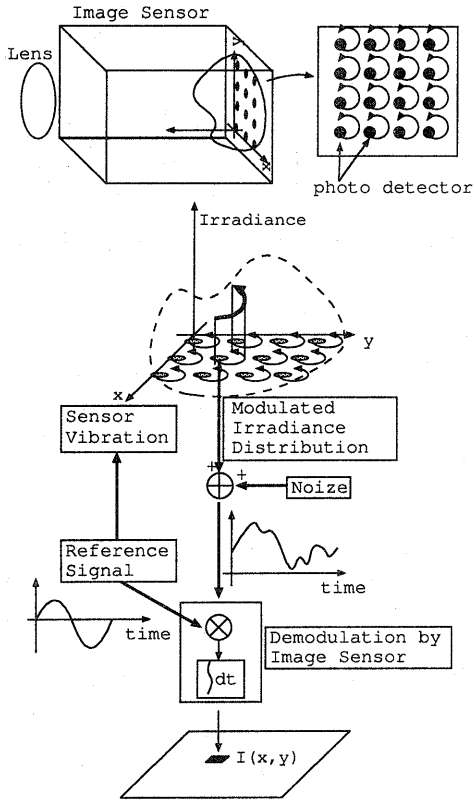


図 1: 固視微動型イメージセンサによる画像の取得。センサを微動させることにより照度分布を時間変調し、参照信号により復調して画像を得る。復調されるのは照度ではなく照度分布であることに注意。変調・復調の操作は、ともにセンサが行う。

2.2 固視微動型センシングの一般論

本節では、固視微動型センサが、微動する軌道と参照信号との組み合わせにより、任意の線形フィルタを施した画像を取得することができることを述べる。

撮像面 (x, y) 上の照度分布を $I(x, y)$ で表す。また、センサの微動の周期を T 、受光素子が描く軌道を C で表す。各時刻における受光素子からの出力電流を $s(x, y; t)$ と置く。周期 T の参照信号 $r_i(t)$ と $s(x, y; t)$ の時間相関 $I_i(x, y)$ は次式で与えられる。

$$I_i(x, y) = \int_0^T I(x + \xi(t), y + \eta(t)) r_i(t) dt \quad (3)$$

上式が画像の線形フィルタリングの操作であることを示すために、空間積分の式に変換する。

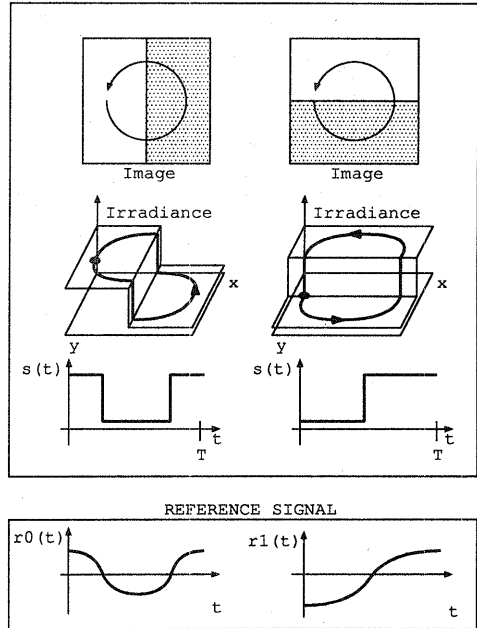


図 2: センサを円運動させたときの局所的な照度分布の変調。像の回転は受光素子の出力信号 $s(x, y; t)$ の位相を変化させる。信号 $s(x, y; t)$ の位相は直交検波することにより求めることができる。

時刻 t における受光素子の速度を $v(t)$ とおく。 $v = (d\xi/dt, d\eta/dt)^T$ である。空間 (x, y) 上の関数 $g(x, y)$ を次のように定義する。時刻 t_0 における受光素子の位置を (ξ_0, η_0) で表す。 $g(x, y)$ は、軌道上の各点においては次式を満たし、軌道以外の点では $g(x, y) = 0$ であるとする。

$$g(\xi_0, \eta_0) = r_i(t_0)/|v(t_0)| \quad (4)$$

微少時間 δt の間に受光素子が移動する距離 $\delta l = |v|\delta t$ である。このことから式 (3) 右辺は、次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & \int_0^T I(x + \xi(t), y + \eta(t)) r_i(t) dt \\ &= \int_C I(x + \xi, y + \eta) r_i(\xi(t), \eta(t)) / |v(t)| dl \quad (5) \\ &= \int_C I(x + \xi, y + \eta) g(\xi, \eta) dl \\ &= \int_\Omega I(x + \xi, y + \eta) g(\xi, \eta) d\xi d\eta \end{aligned}$$

ただし Ω は受光素子の軌道 C を含む全領域である。固視微動型イメージセンサにより、照度分布 $I(x, y)$ とフィルタ $g(-x, -y)$ との畳み込み演算が行われていることが分かる。

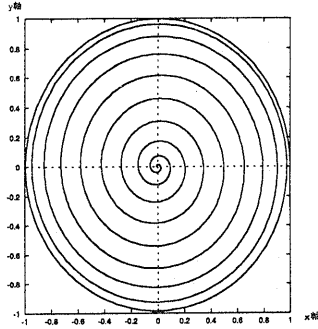


図 3: 受光素子を面状に走査させる

例えば式 (6) に従ってセンサを微動させると、 N を大きくするに従い、各受光素子の軌跡は図 3 に示すように次第に面内を覆うようになる。このとき適切に $g(x, y)$ を定めることにより、2次元フィルタを畳み込んだ画像を作成することができる。

$$u = \left(\frac{\Delta}{2} \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) + R \right) \begin{pmatrix} \cos \left(\frac{2\pi N t}{T} \right) \\ \sin \left(\frac{2\pi N t}{T} \right) \end{pmatrix} \quad (6)$$

センサの微動のさせ方、および参照信号の与えかたに大きな自由度があり、このため、画像を取得する際に画像に施すことのできる操作にも大きな自由度があることが分かる。

3 センサの円運動と三角関数の参照信号による画像の微分

本節では、画像処理にとって基本的な演算である画像の 1 階微分および 2 階微分を、固視微動型イメージセンサを用いて直接行う手法について説明する。

3.1 変調信号のフーリエ係数と画像の微係数

撮像面上の照度分布を $I(x, y)$ で表す。各受光素子が微小な半径 R の円軌道を描くよう、センサを角速度 ω で微動させる。一般性を失うこと無く、注目している受光素子の円軌道の中心を原点とすることができる。まず $I(x, y)$ を原点周りにテイラー展開し、 $I(x, y)$ を原点における微分値を用いて表現する。

$$I(x, y) = I + I_x x + I_y y + I_{xx} x^2/2 + I_{yy} y^2/2 + I_{xy} xy + I_{xxx} x^3/6 + I_{yyy} y^3/6 + \dots \quad (7)$$

ただし $I_{xx} = \partial^2 I / \partial x^2|_{(x,y)=(0,0)}$ など、原点における偏微分を I の添字を用いて表した。

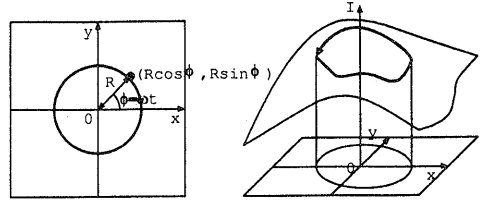


図 4: センサの円運動により照度分布を変調する

時刻 t における受光素子の位置は

$(x, y) = (R \cos(\omega t), R \sin(\omega t))$ となる。式 (7) に代入することにより円運動による変調信号 $s(0, 0; t)$ を表す式 (8) を得る。ただし R について 3 次以上の項を無視した。

$$s(0, 0; t) = I + R^2(I_{xx} + I_{yy})/4 + R \cdot I_x \cos(\omega t) + R \cdot I_y \sin(\omega t) + R^2(I_{xx} - I_{yy}) \cos(2\omega t)/4 + R^2 \cdot I_{xy} \sin(2\omega t)/2 \quad (8)$$

参照信号として $r_{ci}(t) = \cos(i\omega t)$, $r_{si} = \sin(i\omega t)$ を用意し、 $s(0, 0; t)$ との時間相関を求める。得られる結果は $s(0, 0; t)$ のフーリエ係数である。 r_{ci} との時間相関を I_{ci} , r_{si} との時間相関を I_{si} などと表すと、式 (8) より次式が得られる。これらはいずれも、それぞれの参照信号に対応して、センサが画像として直接出力する値である。

$$\begin{cases} I_{c0} = I(0, 0) + R^2(I_{xx} + I_{yy})/4 \\ I_{c1} = R \cdot I_x \\ I_{s1} = R \cdot I_y \\ I_{c2} = R^2(I_{xx} - I_{yy})/4 \\ I_{s2} = R^2 \cdot I_{xy}/2 \end{cases} \quad (9)$$

先に述べた通りセンサを円運動させて、参照信号に $\cos(\omega t)$, $\sin(\omega t)$ を用いることにより、画像の x 微分 y 微分の値を求めることができる。

参考として、図 5 に円軌道上に参照信号 $\cos(\omega t)$ および $\cos(2\omega t)$ の値をプロットしたものを示す。図 5 左は、平面と円筒の交線となっている。一般に、 $I(x, y)$ が x, y の N 次式で表されるとき、円運動で変調した信号 $s(x, y; t)$ のフーリエ級数展開は高々 N 次までの項しか含まない。

3.2 同心円軌道による 2 階微分の計算

ところで式 (9) に示されているように、 I_{c0} すなわち $s(0, 0, t)$ のバイアス項は $I(0, 0)$ と $I_{xx} + I_{yy}$ とを

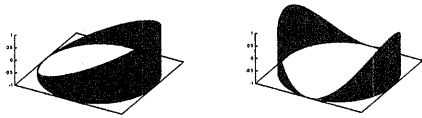


図 5: 円弧上にプロットした参照信号 $\cos(\omega t)$ および $\cos(2\omega t)$ の値

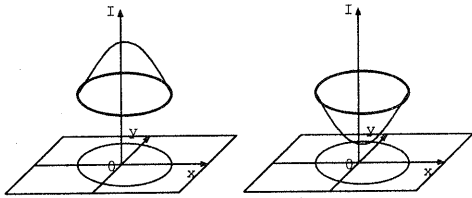


図 6: 単純な円運動では区別できない二つの照度分布

ともに含んでいる。このためこのままでは I_{xx} および I_{yy} の値を求めることができない。このことは円軌道上の照度分布だけでは、図 6 に示すような照度分布の違いを区別できないことと等価である。

I_{c0} が含む項のうち、 $I(0,0)$ の項は円軌道の半径を変えても変化しない。そこで受光素子が半径の異なる 2 つの同心円を描くようセンサを微動させ、それぞれの軌道に対応する I_{c0} の差が得られるよう参照信号を定める。このとき得られる結果は $I(0,0)$ が打ち消され、 $(x,y) = (0,0)$ におけるラプラシアン $I_{xx} + I_{yy}$ となる。以下、2 つの同心円状に微動させることによる画像の 2 階微分の求め方について説明する。

同心円の中心を $(0,0)$ とし、一方の円 (A) の半径を $R + \Delta$ もう一方の円 (B) の半径を R とする (図 7)。受光素子が各円を 1 周するのに要する時間を $T/2$ とし、 $\omega = 4\pi/T$ とする。受光素子が円 A 上を動くときの参照信号は $r_{ci}(t) = \cos(i\omega t)$ および $r_{si} = \sin(i\omega t)$ とし、円 B 上を動くときには参照信号の符号を反転させ $r_{ci}(t) = -\cos(i\omega t)$ および $r_{si} = -\sin(i\omega t)$ とする。センサの位置

$u(t) = (x(t), y(t))^T$ および参照信号をまとめると次のようになる。

$$u(t) = \begin{cases} (R + \Delta)(\cos(\omega t), \sin(\omega t))^T & (t \in T_A) \\ R(\cos(\omega t), \sin(\omega t))^T & (t \in T_B) \end{cases} \quad (10)$$

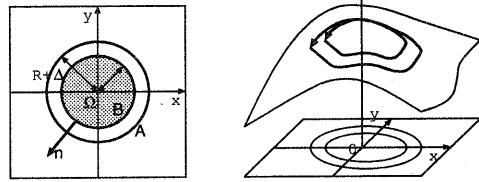


図 7: 軌道を 2 つの同心円とすることにより 2 階微分まで求める

$$r_{ci} = \begin{cases} \cos(i\omega t) & (t \in T_A) \\ -\cos(i\omega t) & (t \in T_B) \end{cases} \quad (11)$$

$$r_{si} = \begin{cases} \sin(i\omega t) & (t \in T_A) \\ -\sin(i\omega t) & (t \in T_B) \end{cases}$$

ただし i は 0 以上の整数とし、また T_A, T_B はそれぞれ整数 n を用いて $T_A = [nT, nT + T/2]$, $T_B = [nT + T/2, nT + T]$ と表される区間であるとする。このとき復調される画像特徴を次式に示す。ただし Δ の高次の項を無視した。半径の異なる 2 つの同心円に対応する復調信号の差を求めることは、式 (9) をそれぞれ R で偏微分することと等価である。

$$\begin{cases} I_{c0} = R\Delta(I_{xx} + I_{yy})/2 \\ I_{c1} = \Delta \cdot I_x \\ I_{s1} = \Delta \cdot I_y \\ I_{c2} = R\Delta(I_{xx} - I_{yy})/2 \\ I_{s2} = R\Delta \cdot I_{xy} \end{cases} \quad (12)$$

センサが照度分布のラプラシアンや x, y による偏微分画像を直接出力することが分かる。先にも述べた通り、センサにより計測されるこれら特徴量は、量子化誤差や参照信号と無関係なノイズによる誤差を含まない。画像の 2 階微分を求めるには、センサ出力を用いて次式を計算すれば良い。

$$\begin{aligned} I_x &= I_{c1}, & I_y &= I_{s1}, \\ I_{xx} &= I_{c0} + I_{c2}, & I_{yy} &= I_{c0} - I_{c2}, \\ I_{xy} &= I_{s2}. \end{aligned} \quad (13)$$

参照信号 r_{c0} は受光素子が軌道 A 上にあるときに +1、軌道 B 上で -1 の値をとる。参照信号 r_{c0} により復調される特徴量は、式 (12) に示したように画像のラプラシアン $I_{xx} + I_{yy}$ である。円軌道上の照度分布よりラプラシアンを求めることについて説明を加える。円軌道に囲まれた領域を Ω で表すと (図 7) グリーンの定理より次式が成り立つ。

$$\int_{\Omega} I_{xx} + I_{yy} d\sigma = \int_{\partial\Omega} \nabla I \cdot nds. \quad (14)$$

ただし、 $d\sigma$ は面要素、 $\partial\Omega$ は円軌道、 \mathbf{n} は円軌道の外向き法線ベクトル、 ds は円軌道上の線分要素である。上式右辺を、極座標表現し、 $\nabla I \cdot \mathbf{n}$ を差分により近似すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_{\partial\Omega} \nabla I \cdot \mathbf{n} ds &\simeq \int_{\partial\Omega} \frac{I(R+\Delta R, \theta) - I(R, \theta)}{\Delta} ds \\ &= \frac{R}{\Delta R} \left\{ \int_0^{2\pi} I(R+\Delta) d\theta - \int_0^{2\pi} I(R) d\theta \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

右辺第一項が参照信号+1と軌道Aにおける照度との時間相関、第二項が-1と軌道Bにおける照度との時間相関である。軌道を2つの同心円とし参照信号に r_{c0} を用いることは、円の法線方向の照度勾配を円軌道に沿って積分した値を求めることであり、この値がラプラシアン面積分と一致する。

4 実験結果

4.1 8×8画素の時間相関センサを用いた画像の微分値計測

我々の研究室で試作した8×8画素の時間相関センサを用い、第3.1節で述べた手法により画像の x および y 微分を計測する実験を行った。図8に示すように、対象と時間相関センサの間に振動鏡を置き、対象を撮影した。振動鏡は制御信号により鏡の法線方向を円弧状に微動させることができる。参照信号には $\cos(\omega t)$ 、 $\sin(\omega t)$ の二つを用意し、参照信号に同期させて振動鏡を円弧状に微動させた。振動鏡および参照信号の周波数はおよそ150Hzとした。これは実験に用いた振動鏡の構造上の制約により定められた周波数である。時間相関センサ自身は、100kHz以上の周波数による時間相関演算を行うことができる。これはビデオレートと比較して、十分な演算性能である。

振動鏡を介すること無く従来のイメージセンサで取得した画像、および固視微動型センサで取得した x 微分画像および y 微分画像を図9に示す。参照信号に \cos を用いて得られた画像は x 微分画像に、 \sin を用いたものは y 微分画像にそれぞれなっていることが分かる。

4.2 シミュレーション実験

十分な解像度で取得された画像を固視微動型イメージセンサの撮像面上の照度分布とみなし、第3.2節で述べた手法に関するシミュレーションを行った。試作したイメージセンサの受光素子の大きさと受光素子間の距離の比はおおよそ3:8である(図10左上)。そこで、1)受光素子の大きさを考慮し元画像をガウシア

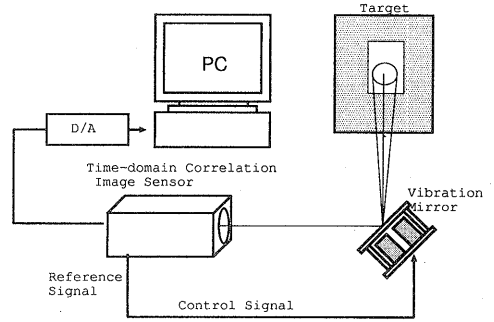


図8: 試作した8×8の時間相関センサを用いた微分画像計測の実験系。変調には対象とセンサの間においた振動鏡を利用した。

ンフィルタで平滑化し、2)受光素子間の距離を考慮して平滑化した画像をサンプリングし、3)各サンプル点を中心とした円弧上の画素値を順にたどり各時刻の受光素子の出力とみなした(図10)。

第3.2節で述べた通り、画像の2階微分までを求めるにはセンサを半径の異なる2つの同心円状に微動させなければならない。式(10)に示したような空間的に連続ではない軌道でセンサを微動させることは容易ではない。そこで同心円運動の近似として螺旋状の微動を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションで用いた螺旋状の軌跡 $\mathbf{u}(t) = (x(t), y(t))^T$ は、式(6)の通りである。

ただし微動の周期を T 、1周期のセンサの回転数を N とした。センサの運動を螺旋に変更したことにもない、式(11)に示した参照信号を次式のように近似した。時刻 $t = 0$ で+1、 $t = T/2$ で-1となるよう各三角関数に $\cos(2\pi t/T)$ をかけている。

$$\begin{aligned} r_{ci} &= \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \cos\left(\frac{2\pi i N t}{T}\right) \\ r_{si} &= \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \sin\left(\frac{2\pi i N t}{T}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

図11に、 $N = 10$ としたときの螺旋軌道上に r_{c0} をプロットしたものを示す。軌道の外側から内側へと、参照信号の値が次第に+1から-1へと変化していく様子が分かる。

シミュレーションに用いた各パラメータの値はガウシアンフィルタの標準偏差 $\sigma = 3$ pixel、サンプリング点間の距離16pixel、円軌道の半径 $R = 4$ pixel、 $\Delta = 3$ pixel、螺旋の回転数 $N = 10$ とした。

図12に文字画像に対する実験結果を示す。図12上に示した元画像に対して、上で述べた軌道上の画素値を順次読みとり、式(16)に示した参照信号との時間

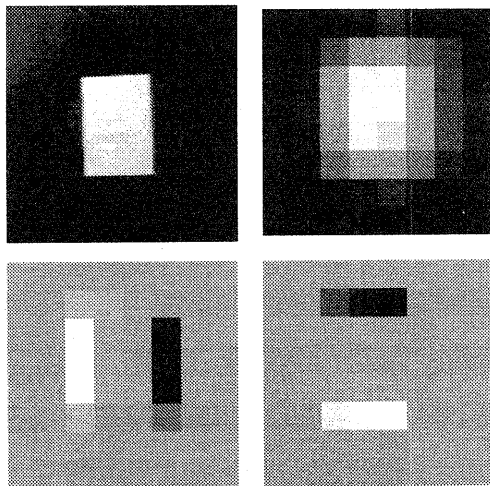


図 9: 試作した 8×8 時間相関センサを用いて得られた x および y 微分画像。上左:対象。上右:時間平均画像。下左: \cos を参照信号として得られた x 微分画像。下右: \sin を参照信号として得られた y 微分画像。

相関画像 I_{c0} , I_{c1} , I_{s1} , I_{c2} , I_{s2} をそれぞれ示す。それぞれ画像のラプラシアン、 x , y による偏微分画像などが得られていることが分かる。

5 おわりに

本稿では、固視微動型イメージセンサを用いて、画像の特徴量を画像を取得する際に直接計測する手法を提案した。固視微動型イメージセンサとは、画像を計測する際にセンサを微動させ画像特徴を変調し、センサの動きと同期した参照信号により復調することにより画像特徴を計測するセンサである。従来の量子化された画像の差分演算などにより特徴量を求める手法と異なり、量子化誤差を含まずに特徴量を求めることができる。また、参照信号と無相関なノイズを除去することもできる。

本稿ではセンサを円状に微動させ、三角関数の参照信号を用いて画像の微係数を直接計測する手法について説明した。また、試作したセンサによる実験およびシミュレーションにより、提案手法が画像の微分値を精度良く直接計測できることを確認した。

量子化や雑音の影響を除去して正確な特徴量を複数同時に求めることのできる本手法の利点は、画像処理・認識システムにとって有用であると考えられる。

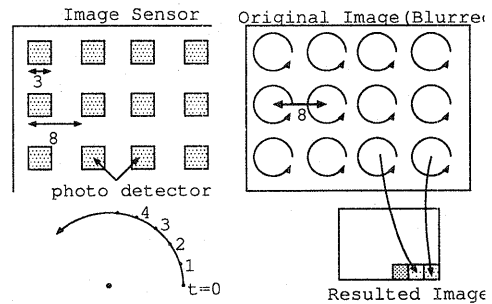


図 10: シミュレーション実験。上左:実機の受光素子および受光素子間の距離の大きさの比。上右:受光素子の大きさ程度で平滑化をし、受光素子間隔程度でサンプリングする。下左:各サンプリング点周りで受光素子の軌道上の画素値を順にたどる。下右:各サンプリング点で時間相関を計算し結果画像を作成する。

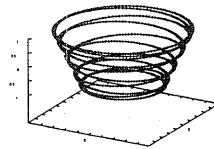


図 11: シミュレーションで用いた螺旋軌道上での参照信号

参考文献

- [1] 安藤, 中村, 坂口, “超高速時間相関検出型イメージセンサ” 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会資料, SSA-96-13, 1996.
- [2] S. Ando, K. Nakamura, and T. Sakaguchi, “Ultrafast Correlation Image Sensor,” Proc. IEEE Workshop on CCD and AIS, Bruges, 1997.
- [3] T. Sakaguchi, T. Nakamura, and S. Ando, “Ultrafast correlation image sensor: fabrication and experiments with 8×8 pixels model,” Tech. Digest of 15th Sensor Symposium, pp.111-114, Kawasaki, Japan, 1997.
- [4] 来海 暁, 安藤 繁, “固視微動を利用したセンサレベルの画像特徴抽出,” 電気学会 E 部門総合研究会資料, SSA-43, 1997.
- [5] A. Kimachi, R. Imaizumi, and S. Ando, “Intelligent Image Sensor with a Vibrating Mirror

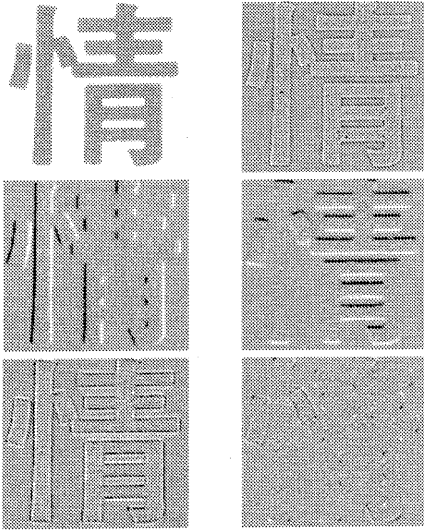


図 12: シミュレーション結果。上左：元画像。

Mimicking Involuntary Eye Movement,” Proc. 16th Sensor Symposium, pp.171-176, Kawasaki, 1998.

- [6] A. Kimachi and S. Ando, “Time-Domain Correlation Image Sensor: First CMOS Realization and Evaluation,” Proc. Transducers’99, Sendai, pp.958-961, 1999.

A 付録：時間相関イメージセンサ

時間変化する受光素子の出力信号 $f(x, y; t)$ と参照信号 $r_i(t)$ との時間相関演算を各画素ごとに行うセンサ（以下、時間相関センサと呼ぶ）を我々の研究室では開発している。時間相関センサは、計測対象の変調方法を工夫することにより、画像の特徴の他にも様々な対象の計測に応用可能なセンサである。先頃東京大学の大规模集積設計教育センター（VDEC）を利用し、 64×64 画素の CMOS 時間相関センサを試作し、基本動作を確認した [6]。この時間相関センサの仕組みについて簡単に説明する。

受光素子にはフォトダイオードを用いる。フォトダイオードは照度に比例した電流 $I_{PD}(t)$ を発生する。照度分布の復調に用いる参照信号 $r_i(t)$ はセンサの外部より全画素共通に供給される。 $I_{PD}(t)$ と $r_i(t)$ との時間相関演算は、電流による乗算器、および乗算された電流 $I_{PD}(t)r_i(t)$ を電荷として蓄積し積分するキャ

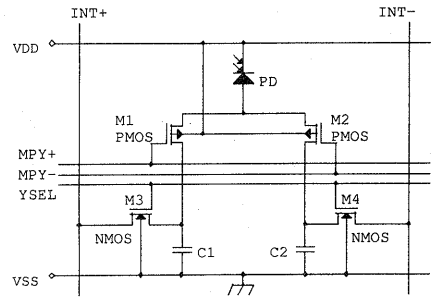


図 13: 時間相関センサの 1 画素の回路

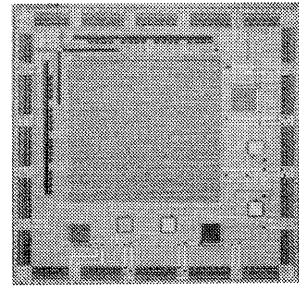


図 14: 試作された時間相関センサチップ

パシタとを用いて行う。キャパシタに蓄積された電荷は MOS スイッチにより読み出す。1 画素の回路図を図 13 に示す。

回路図中 M1 および M2 は乗算回路を構成する [2]。フォトダイオード PD において発生した照度に比例する電流 I_{PD} は、M1, M2 それぞれのゲート電圧の差 $\Delta V_{MPY} = V_{MPY-} - V_{MPY+}$ に応じて M1 および M2 のドレイン電流 I_{D+} および I_{D-} に次式で表されるように振り分けられる。

$$I_{D\pm} = \frac{I_{PD}}{2} \pm g_m(t) \frac{\Delta V_{MPY}(t)}{2} \quad (17)$$

M1, M2 をサブスレシヨルド領域で動作させるとき、伝達コンダクタンス $g_m(t)$ について $g_m(t) = \rho I_{PD}(t)$ が成り立つ。ここで ρ は定数である。時間 T の間にキャパシタ C_1, C_2 のそれぞれに蓄積される電荷 Q_+, Q_- は $Q_{\pm}(t) = \int_{t-T}^t I_{D\pm}(\tau) d\tau$ と表されるので、次式で示すように I_{PD} と ΔV_{MPY} の時間相関を求めることができる。

$$Q_+ - Q_- = \rho \int_{t-T}^t I_{PD} \Delta V_{MPY}(\tau) d\tau \quad (18)$$

試作された時間相関センサの写真を図 14 に示す。