

複素正弦波変調撮像によるオプティカルフロー検出理論 および時間相関イメージセンサによる実現

安藤 繁^{†1} 魏 大比^{†1} ポル マズレル^{†1}

本論文では、オプティカルフロー偏微分方程式に立脚する画像速度場の新たな代数的厳密解法について、我々の最新の成果を述べる。この偏微分方程式に基づく従来法は、数値微分によって得られた画像の時空間勾配を観測量とする線形方程式を解くというものであったが、微分の段階で多大な誤差が入る点に大きな問題があった。これに対して提案法では1フレーム時間の時間荷重積分を観測量にとり、同時にオプティカルフロー偏微分方程式の荷重積分によりこの観測量に関する厳密な代数方程式を得る。この原理は、時間相関イメージセンサによって同時取得される強度画像と複素正弦波変調画像の組に対してまさに好適である。単一フレームのみで画素ごとに対象の速度ベクトルを復元でき、フレーム間のエアリング誤差や差分近似の精度に由来する対象速度の制限も取り除かれ、容易に実時間のオプティカルフロー推定を可能にする。

Optical Flow Detection via Complex-sinusoidally Modulated Imaging and Its Realization with Correlation Image Sensor

SHIGERU ANDO,^{†1} DABI WEI^{†1} and PAUL MASUREL^{†1}

This paper describes a novel, exact, and algebraic solution for optical flow estimation based on the optical flow partial differential equation (PDE). The conventional methods based on the PDE use numerical evaluation of spatio-temporal differentials, which has been really an unmanageable source of error. The proposed method use weighted time-integrals of incident light as the measurement quantities, and also obtain an exact algebraic equation by the weighted integral of the PDE. It is featured as: 1) single frame is sufficient and no temporal differentiation is needed, 2) free from inherent velocity limit due to temporal differentiation, and 3) aperture problem can be significantly reduced.

1. はじめに

オプティカルフローとは、3次元中の運動物体が2次元平面に結像して生じる明暗の動きである。3次元運動や立体の強力な情報源として、動画像からこのような速度場を推定する問題には、これまでも数多くの研究がなされてきた¹⁾⁻⁵⁾。代表的な方法論はおおよそ3種類に分類されよう。1つは、局所領域のフレーム間の対応付けによる方法であり、直感的で数多く実用されるものの、パターンの伸縮回転などの変化に弱い、速度場の解像度が低いなどの問題を持つ。他の1つは時空間周波数領域における動画像のスペクトル構造を利用する方法であり、問題に独特の視点を与える点で大変興味深いが、実用上必須な有限な観測時間と観測領域に対して数学的な厳密性が失われ、精度や解像度

が低下する問題を持つ。残りの1つは、像点の明るさの移動不変性を記述する時空間方程式であるオプティカルフロー偏微分方程式 (Optical Flow Constraint, OFC) に立脚する方法論である。この方程式は次章にも述べるように厳密で一般性の高いものであるが、これに基づく従来法は、数値微分によって得られた画像の時空間勾配を観測量とする線形方程式を解くという、本来の解析性とは遠い近似的な方法にとどまり、数値微分の段階で多大な誤差が入る、フレーム間での移動量が大きいと方程式自体が破綻するなどの大きな問題をかかえていた。

本論文の主題は、このオプティカルフロー偏微分方程式に立脚する画像速度場の新たな代数的厳密解法にある。我々が新たに導いた方法では、1フレーム時間の時間荷重積分を観測量にとり、同時にオプティカルフロー偏微分方程式の荷重積分によりこの観測量に関する厳密な代数方程式を得る。異なる荷重関数に関するこの代数方程式を連立すればオプティカルフローが

^{†1} 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻
Department of Information Physics and Computing,
The University of Tokyo

得られる．提案法は上記導出の必然としてフーリエ変換を内包するため，有限観測区間における時空間周波数領域法の厳密法，ならびに時空間勾配法と時空間周波数領域法との理論的統合の意味も持つ．

現在の画像認識技術には種々の面で越えがたい壁が存在し，その順調な発展を阻んでいる．このような壁の克服の一方向としてセンシングレベルでの高度化がある．問題に適したセンサの開発と応用は，画像認識の能力と応用範囲の拡大の観点で重要であり，アナログ電子網膜，スマートピクセル，ビジョンチップなど，多くの試みがなされている．我々も，多種多様な2次元センシングと映像化に活用可能な汎用の撮像デバイスとして時間相関イメージセンサを開発してきた^{9)–11)}．時間相関イメージセンサでは，時間変化する入射光と任意の2個の外部参照信号との1フレームにわたる時間相関が全画素上で並列的に形成される．今回報告するオプティカルフロー検出の原理は，時間相関イメージセンサによって同時に得られる強度画像と複素正弦波変調画像に対してまさに好適である．単一フレームのみで画素ごとに対象の速度ベクトルを復元でき，フレーム間のエリアシング誤差や差分近似の精度に由来する対象速度の制限も取り除かれ，容易に実時間のオプティカルフロー推定を可能にする．

2. 前 提

2.1 オプティカルフロー偏微分方程式

運動する対象上の各点は，その点に固定された座標系で観察するならば明るさ一定である，すなわち

$$\frac{d}{dt}f \equiv \left(\frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial t} \right) f = 0 \quad (1)$$

を仮定する．座標系の移動速度すなわち対象の速度を $\partial x/\partial t \equiv v_x$ ， $\partial y/\partial t \equiv v_y$ とおくことにより，即座にオプティカルフロー偏微分方程式

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y) f(x, y, t) + \partial_t f(x, y, t) = 0 \quad (2)$$

を得る．表記の簡単のため偏微分を $\partial_x \equiv \partial/\partial x$ ， $\partial_y \equiv \partial/\partial y$ ， $\partial_t \equiv \partial/\partial t$ と表記した．上記の定義より， v_x ， v_y は，ゆるやかならば座標の関数でも時間の関数であってもよい．これはオプティカルフロー方程式の主要な一般性の1つである．

2.2 オプティカルフロー偏微分方程式の一般解

次章以降で導く方法論の厳密性を議論するうえで，その出発点であるオプティカルフロー方程式の厳密性と成立条件，記述力を明らかにすることは本質的に重要である．以下では前節の導出の逆として，オプティカルフロー方程式の一般解が任意パターンの並進運動であることを示しておく．

最初に運動方向 $\theta = \tan^{-1}(v_y/v_x)$ が X 軸，それに直交する方向が Y 軸となるように変数変換を行う．

$$\frac{\partial}{\partial X} = \frac{1}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \left(v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

より，オプティカルフロー方程式は

$$v \partial_X f(X, Y, t) + \partial_t f(X, Y, t) = 0 \quad (3)$$

と書き換えられる．ただし， $v \equiv \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ である．ここで変数変換

$$\xi = X - vt, \quad \eta = X + vt$$

を導入すると，

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} &= \frac{\partial \xi}{\partial X} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial X} \frac{\partial}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{\partial \xi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \frac{\partial}{\partial \eta} = -v \frac{\partial}{\partial \xi} + v \frac{\partial}{\partial \eta} \end{aligned}$$

ゆえ，式(3)に代入することにより

$$\begin{aligned} v \left(\frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} \right) f(\xi, \eta, Y) + \left(-v \frac{\partial}{\partial \xi} + v \frac{\partial}{\partial \eta} \right) f(\xi, \eta, Y) \\ = 2v \frac{\partial}{\partial \eta} f(\xi, \eta, Y) \\ = 0 \end{aligned}$$

よって $a(\cdot, \cdot)$ を任意の微分可能関数として

$$f(\xi, \eta, Y) = a(\xi, Y)$$

よって，変数をもとに戻すと並進運動パターン

$$f(x, y, t) = \bar{a}(x - v_x t, y - v_y t)$$

を得る．ただし $\bar{a}(\cdot)$ は X, Y 平面で $a(\cdot)$ を θ だけ回転した関数である．

このことは，オプティカルフロー方程式の解空間と，任意明暗パターンの (v_x, v_y) 並進全体が作る空間とが，同一であることを意味する．並進以外で明暗が変化する状況は記述できないものの，微分方程式という局所性に優れた記述法と合わせて，オプティカルフローの推定に関して強い拘束力を持つことを示す．

2.3 局所最小二乗法

オプティカルフロー方程式を用いる従来法は，いずれも時空間の偏微分 $\partial_x f$ ， $\partial_y f$ ， $\partial_t f$ をデジタル画像の時系列から差分によって数値 f_x ， f_y ， f_t として求め，これを代入して線形方程式を得るというものであった．この方法では，オプティカルフロー方程式が偏微分方程式であることは，少なくともも解析的な意味では一向に用いられてはいない点に注意する．具体的なアルゴリズムとしては，大きさ X, Y の微小領域での局所最小二乗法^{6),7)}

$$J \equiv \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} (v_x f_x + v_y f_y + f_t)^2 dx dy$$

$$\rightarrow \min \quad (4)$$

と速度場特異性判定^{7),8)}, 速度場の滑らかさの評価関数を導入した大域的な最適化アルゴリズムである Horn-Schunck の正則化反復法¹⁾

$$J \equiv \iint \{(v_x - \bar{v}_x)^2 + (v_y - \bar{v}_y)^2 + \lambda^2 (v_x f_x + v_y f_y + f_t)^2\} dx dy$$

$$\rightarrow \min \quad (5)$$

ただし \bar{v}_x, \bar{v}_y は速度場の局所平均, λ^2 は Lagrange 定数であり, 積分範囲は画像全体, などがある. これらの方法の最大の隘路は, 前述のように画像から数値微分をとる段階にあり, 差分誤差, 速度過大によるエリアシング誤差など, 画像に依存し多くは予測困難な非常に大きな誤差が生じるため¹²⁾, 精度の高い推定は困難を極める状況であった. このことは, オプティカルフロー方程式の偏微分方程式としての性質が解析的に用いられないことの具体的表れと考えられる.

3. 積分形式オプティカルフロー方程式

オプティカルフロー偏微分方程式の偏微分方程式たる性質を利用するとは, 要するにそれを解析的に積分することである. この方法論を以下に述べる.

3.1 オプティカルフロー偏微分方程式の荷重積分

オプティカルフロー方程式が区間 $[-T/2, T/2]$ で一様に成り立っていると仮定する. すなわち, この区間で速度 (v_x, v_y) は時間的に一定である. このとき最初に, $w(t)$ を区間 $[-T/2, T/2]$ の任意関数としたときに成立する同値関係

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t) f(x, y, t) = 0 \quad \forall t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$$

$$\leftrightarrow \int_{-T/2}^{T/2} \{v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t\} f(x, y, t) \times w(t) dt = 0 \quad \forall w(t) \quad (6)$$

に着目する¹³⁾. 第 2 行の微分演算子は中括弧内のみに作用する. 具体的には, $\{w(t)\}$ を $[-T/2, T/2]$ で完備な関数系に選んで連立することにより, 上記の関係が同値となることが証明される.

この関係を利用すると, オプティカルフロー偏微分方程式を時間方向に積分し, その微分を消去することが以下のように可能になる. すなわち,

$$\int_{-T/2}^{T/2} \{v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t\} f(x, y, t) w(t) dt$$

$$= (v_x \partial_x + v_y \partial_y) \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) w(t) dt$$

$$+ \int_{-T/2}^{T/2} (\partial_t f(x, y, t)) w(t) dt$$

$$= (v_x \partial_x + v_y \partial_y) \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) w(t) dt$$

$$+ [f(x, y, t) w(t)]_{-T/2}^{T/2}$$

$$- \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) \partial_t w(t) dt$$

のように $f(x, y, t)$ の t に関する微分が消え, 荷重関数の微分 $\partial_t w(t)$ を荷重とする積分と, $f(x, y, t)$ と $w(t)$ の積の積分境界における値の差の項 (積分境界値項) が残ることになる. これらは新たな未知量となりうるが, これらを消去するために, 我々にはまだ荷重関数 $w(t)$ の選択の自由度が残されている.

3.2 複素正弦波荷重積分オプティカルフロー方程式

ここで我々は荷重関数として複素正弦関数 $e^{-j\omega t}$ を選ぶ. なぜなら, $\omega T = 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) と選ぶことにより, $\{e^{-j\omega t}\}$ は $[-T/2, T/2]$ において完備な直交関数系をなすことが明らかだからである. さらに注目すべきは,

$$\int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) \partial_t e^{-j\omega t} dt$$

$$= -j\omega \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

のように, 荷重関数の微分による荷重積分が原関数の荷重積分の既知の定数倍となること, さらに積分境界値項が,

$$[f(x, y, t) e^{-j\omega t}]_{-T/2}^{T/2}$$

$$= e^{-j\omega T/2} f\left(x, y, \frac{T}{2}\right) - e^{j\omega T/2} f\left(x, y, -\frac{T}{2}\right)$$

$$= (-1)^n f\left(x, y, \frac{T}{2}\right) - (-1)^n f\left(x, y, -\frac{T}{2}\right)$$

$$= (-1)^n [f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2} \quad (8)$$

のようにすべての荷重周波数 $\omega = 2n\pi/T$ に対して符号を除いて同一となることである. したがって荷重積分を

$$g_w(x, y) \equiv \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t) e^{-j\omega t} dt \quad (9)$$

とおき, 式の簡単のため $s_n \equiv (-1)^n$ とおくと, 複

素正弦波を荷重に用いた荷重積分型のオプティカルフロー方程式は

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y) g_\omega(x, y) + s_n [f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2} + j\omega g_\omega(x, y) = 0 \quad (10)$$

と書かれることになる．この方程式はオプティカルフロー偏微分方程式と同様に厳密で，かつ時間微分が荷重積分に置き換わることにより，それらの複素代数的関係に変換されている．これを，以後（時間領域）オプティカルフロー恒等式（Optical Flow Identity, OFI）と呼ぶことにする．

3.3 オプティカルフロー恒等式の解法

オプティカルフロー恒等式の未知数は，実数の速度 (v_x, v_y) の 2 個と，同じく実数の積分境界値項 $[f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2}$ の 1 個の合計 3 個であり，これに対してオプティカルフロー恒等式は複素であり，1 本で 2 個の制約式を与える．したがって 2 個の周波数 ω_1, ω_2 のオプティカルフロー恒等式に関して連立すると，それらを解くことができる．具体的に，それらの周波数における s_n を s_1, s_2 とすると，方程式は

$$\begin{bmatrix} \partial_x g_{\omega_1} & \partial_y g_{\omega_1} & s_1 \\ \partial_x g_{\omega_2} & \partial_y g_{\omega_2} & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ [f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \omega_1 g_{\omega_1} \\ \omega_2 g_{\omega_2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

となる．特に一方の周波数を直流とすると，直流に対するオプティカルフロー恒等式は実数のため制約式は 3 個に減じるが，それでも 3 個の未知数を決定するには十分である．よって $\omega_1 = \omega, \omega_2 = 0$ とすると， $s_2 = 1$ ゆえ

$$\begin{bmatrix} \partial_x g_\omega & \partial_y g_\omega & s_n \\ \partial_x g_0 & \partial_y g_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ [f(x, y, t)]_{-T/2}^{T/2} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \omega g_\omega \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

よって積分境界値項が消去された

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y)(g_\omega(x, y) - s_n g_0(x, y)) + j\omega g_\omega(x, y) = 0 \quad (13)$$

を得る^{14),15)}．この方程式の未知数は (v_x, v_y) の 2 個，方程式は複素で 2 個の制約式を与えるため，開口問題の条件が成立する場合，すなわち式 (12) の左辺行列の 2×2 部分行列が

$$\det \begin{bmatrix} \partial_x(g_\omega - s_n g_0) & \partial_y(g_\omega - s_n g_0) \\ \partial_x g_0 & \partial_y g_0 \end{bmatrix} = 0$$

となる場合を除いて一意に解くことができる．これら複数の荷重積分は，同一の観測区間から取得可能なことに注意する．すなわち，この区間をフレームとするならば，単一フレーム単一画素でのオプティカルフロー推定法が与えられたことになる．また同時に積分境界値も決定されるため，運動ぼけのない静止画像が得られることも意味する^{16),17)}．

4. 時間相関イメージセンサ

このような荷重積分は，蓄積中に光電変換利得を高速に変化させることができるイメージセンサがあれば，ハードウェア的な実装と取得が可能であり，大変有力な開発目標と考えられよう．しかし実情は逆順で，このようなイメージセンサを我々はすでに開発していた．このイメージセンサによる動画の撮像結果，すなわち後に述べる位相スタンプ画像を分析する中で，前章で述べた理論が生み出された．本章では，最初にこのイメージセンサの仕組みを述べ，次にこのデバイスの動画に対する特有な応答について言及する．

4.1 基本構成

時間相関イメージセンサは，相関検出を 2 次元並列に行う半導体集積デバイスである．相関の一方の信号は光入力，他方の信号は全画素共通に電氣的に与える参照信号である．直交相関検出への適用を想定し，参照信号は 2 系統を同時に与えてそれぞれの相関出力が同時に得られるようにする．相関出力の読み出しは，通常のフレームレートでの画素走査による．相関の積分時間はフレーム時間に一致するが，連続したフレームの読み出し結果を外部で加算すれば，その連続フレーム全体が積分時間となるように構成する．

a) MOS 単相相関回路

サブスレッショルド領域における MOS トランジスタの理論特性は，ゲート電圧 V_G ，ソース電圧 V_S ，ドレイン電圧 V_D により

$$I = I_0 e^{-\frac{qV_G}{kT}} \left(e^{\frac{qV_S}{kT}} - e^{\frac{qV_D}{kT}} \right) \quad (14)$$

と書かれる． I_0 は $V_{GS} \equiv V_G - V_S = 0$ で $V_{DS} \equiv V_D - V_S$ が十分に大きい場合（飽和領域動作）のチャネル電流， q は電子の電荷， T はここでは絶対温度， κ はゲート感度係数を示す． $|V_{DS}| \gg |kT/q| \sim 26 \text{ mV}$ で飽和領域に入り，

$$I = I_0 e^{-\frac{q\kappa V_{GS}}{kT}} \quad (15)$$

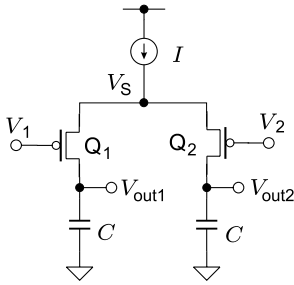


図 1 MOS トランジスタを用いた単相相関回路．フォトダイオードの電流を参照信号 V_1, V_2 に従って Q_1, Q_2 で分流しコンデンサに蓄積する．1 フレームに 1 回，蓄積した電荷を読み出すと同時に，次の蓄積に備えて電荷をリセットする

Fig. 1 Single-phase correlation pixel circuit using MOS transistors. Photo-diode current is divided by Q_1, Q_2 according to reference voltages V_1, V_2 and accumulated by capacitors. The charges are read out once a frame and reset for the consecutive accumulation.

のような指数特性で十分よく近似できるようになる．いま，図 1 のように，共通ソースを有する差動増幅回路の入力を V_1, V_2 ，その平均電圧を \bar{V} とし，ソースを電流 I の被制御電流源とした回路構成を考えると，

$$I_1 - I_2 = -\frac{q\kappa}{2kT}I(V_1 - V_2) + \frac{1}{2}\left(\frac{q\kappa}{kT}\right)^2I(V_1^2 - V_2^2) = -\frac{q\kappa}{2kT}I(V_1 - V_2) \quad (16)$$

$$I_1 + I_2 = I \quad (17)$$

であり，行列形式に書き換えると

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = -\frac{q\kappa}{2kT} \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} \quad (18)$$

のような I と $V_1 - \bar{V}, V_2 - \bar{V}$ の積の関係式を得る． I_1, I_2 が容量 C に電荷として蓄えられ相関値となる．

b) MOS 三相相関回路

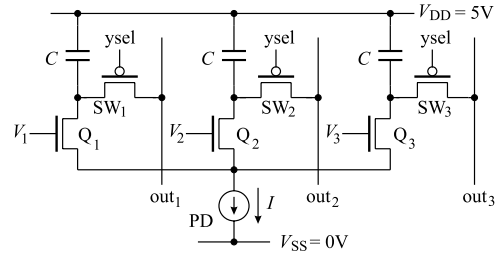
図 3 に示す 1 度に 2 個の独立信号との相関値を得る三相型では，図 2 (a) のように三対称に構成する．この図では，実際の回路に合わせて乗算トランジスタを NMOS 型としている．乗算特性は

$$\begin{bmatrix} I_1 - I/3 \\ I_2 - I/3 \\ I_3 - I/3 \end{bmatrix} = -\frac{q\kappa}{3kT} \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \\ I(V_3 - \bar{V}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

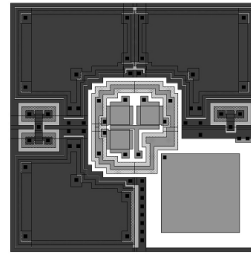
のように与えられる．

4.2 最小二乗振幅位相検出

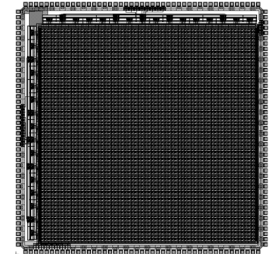
検出すべき周期的な光強度変化を



(a) pixel circuit



(b) pixel layout



(c) chip photograph

図 2 三相時間相関イメージセンサの画素回路と画素レイアウトとチップ写真．64 × 64 画素デバイス例．画素レイアウトの中央部は乗算トランジスタ，その左右は読み出しトランジスタ，右下はフォトダイオード，それ以外は蓄積コンデンサ

Fig. 2 The circuit, pixel layout, and chip photograph of 64 × 64 pixel three-phase correlation image sensor. In the pixel layout, the center is the multiplier transistors, left and right side of it is the read-out transistors, bottom right is the photo-diode, and the other is the accumulation capacitors.



図 3 三相時間相関イメージセンサを用いた時間相関カメラ．左側の 3 個の BNC コネクタより参照信号を供給し，3 本の相関ビデオ出力を A/D 変換して USB 経由で PC に出力する

Fig. 3 Lock-in camera using 3PCIS. The three correlation outputs are A/D-converted and transferred to a PC via the USB.

$$f(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (20)$$

とする．ここで位相が互いに $2\pi/3$ 異なる三相正弦波参照信号 $(\cos \omega t, \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}), \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}))$ をイメージセンサに与える．これらと光強度入力との相関により，画素には相関値

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \\
& = \langle f(t) \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \rangle + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \\
& = \frac{A}{2} \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \quad (21)
\end{aligned}$$

が形成される．ここで (ξ_1, ξ_2, ξ_3) はセンサ雑音を表している．そこで，誤差の二乗ノルムを評価関数

$$\begin{aligned}
J & = \left(\frac{A}{2} \cos \phi - g_1 \right)^2 + \left\{ \frac{A}{2} \cos \left(\phi - \frac{2\pi}{3} \right) - g_2 \right\}^2 \\
& + \left\{ \frac{A}{2} \cos \left(\phi - \frac{4\pi}{3} \right) - g_3 \right\}^2 \rightarrow \min \quad (22)
\end{aligned}$$

とし，これを最小化するような振幅 A と位相 ϕ を定めると，光強度入力位相と振幅の推定値として

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(g_2 - g_3)}{2g_1 - g_2 - g_3} \right) \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
A & = \frac{4}{3} \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 - g_1 g_2 - g_2 g_3 - g_3 g_1} \\
& = \frac{2}{3} \sqrt{(2g_1 - g_2 - g_3)^2 + 3(g_2 - g_3)^2} \quad (24)
\end{aligned}$$

が得られる．

4.3 位相スタンプ撮像

時間相関イメージセンサの通常の応用は，変調光を照射したり対象に与えた摂動で変調されたりして戻ってきた光を見るという能動計測手法の2次元並列的な適用にある^{18),19)}．しかし，位相スタンプ撮像はこれと異なり，対象には何らの働きかけは行わず，イメージセンサ側のみ参照信号を与えて対象を撮像する．

この方法の意義が最も分かりやすいのが，対象がまばらな点で構成される場合である．このような光点の移動を一定周波数の参照信号のもとで撮像すると，その通過時刻が軌跡上の位相分布として相関画像上に記録される．静止物体や背景は強度画像には混合するが相関画像上には現れない．この例を図4(a), (b)に示す．対象は回転する円板上にランダムに分布する点であり，(a)は参照信号の正弦波を1フレームに4周期が入るように設定したものの，(b)は1周期に設定したものである．それぞれ，左から強度画像，相関振幅画像，位相を色相で示した相関位相画像を示す．相関位相画像には軌跡に沿って位相分布が記録されており，(a)では 8π ，(b)では 2π が連続して分布している．シャッタやストロボなどによる振幅変調撮像と異なり，複素正弦波変調撮像では変調による振幅変化は現れず，

それと対照的に滑らかで連続した時間情報が相関位相画像に記録される．

より複雑な対象では，構成する点の軌跡が重なり合い，このような時刻と位相の単純な対応は生じない．しかし，前章で述べたように，複素正弦波変調撮像としてオプティカルフロー推定に好適な記録を与える．図4(c), (d)に撮像例を示す．相関画像は色相による位相も加えて表示している．人形が頭を振る際に，その輪郭に沿って相関画像が非零となり，輪郭に直交する運動方向に位相分布が発生しているのが分かる．従来撮像法では運動ばけをともなった左端の強度画像のみしか得られなかったことと比較すると，複素の相関画像に含まれる運動情報の豊富さが実感できる．

5. 実験例と考察

従来法との性能比較や推定可能な速度範囲の検証については，既発表の別論文²⁰⁾で詳細に述べられている．ここでは重複を避け，参照信号周波数選択の基本的な考え方，ならびにいくつかの検出例を用いて，方法の特徴に関する考察と現状の問題点などを示す．

5.1 対象の速度・空間周波数と参照信号周波数

提案法によるオプティカルフロー検出能力は対象の空間周波数スペクトルと参照信号周波数によって変化する．このことは，対象速度 v_x に依存する運動ばけの点広がり関数とその空間周波数特性

$$\begin{aligned}
h(x) & \equiv \text{rect} \left(\frac{x}{v_x T} \right) e^{j(\omega/v_x)x} \\
\stackrel{\mathcal{F}}{\longleftrightarrow} H(u) & \equiv |v_x T| \text{sinc} \left(v_x T \left(u - \frac{\omega}{v_x} \right) \right) \quad (25)
\end{aligned}$$

によって示される．この関係を図5に示す．すなわち， $\omega = 0$ の強度画像では原点を中心とし通過域が $v_x T$ に反比例する sinc 関数で低域通過フィルタされ， $\omega = 2\pi n/T$ の相関画像では ω/v_x を中心とし広がりが同じく $v_x T$ に反比例する sinc 関数で帯域通過フィルタされる．したがって，速度の上昇にともない，空間軸上では点広がり関数幅の広がりと空間勾配（強度画像では通常の明度勾配，相関画像では主に位相勾配）の減少が生じ，周波数軸上では通過域の狭まりと低周波へのシフトが生じる．空間勾配の減少は空間微分の精度を悪化させるが，提案法では参照信号周波数を大きくとることで，この悪条件を相関画像の側で回避できる．ただし，これは空間周波数の通過域を上昇させるため，これが対象のスペクトル範囲（図5(b)に模式的に灰色で示す）を超えると振幅が減少し，やはり位相勾配の検出が困難となる．このことが提案法における速度検出限界を与える．

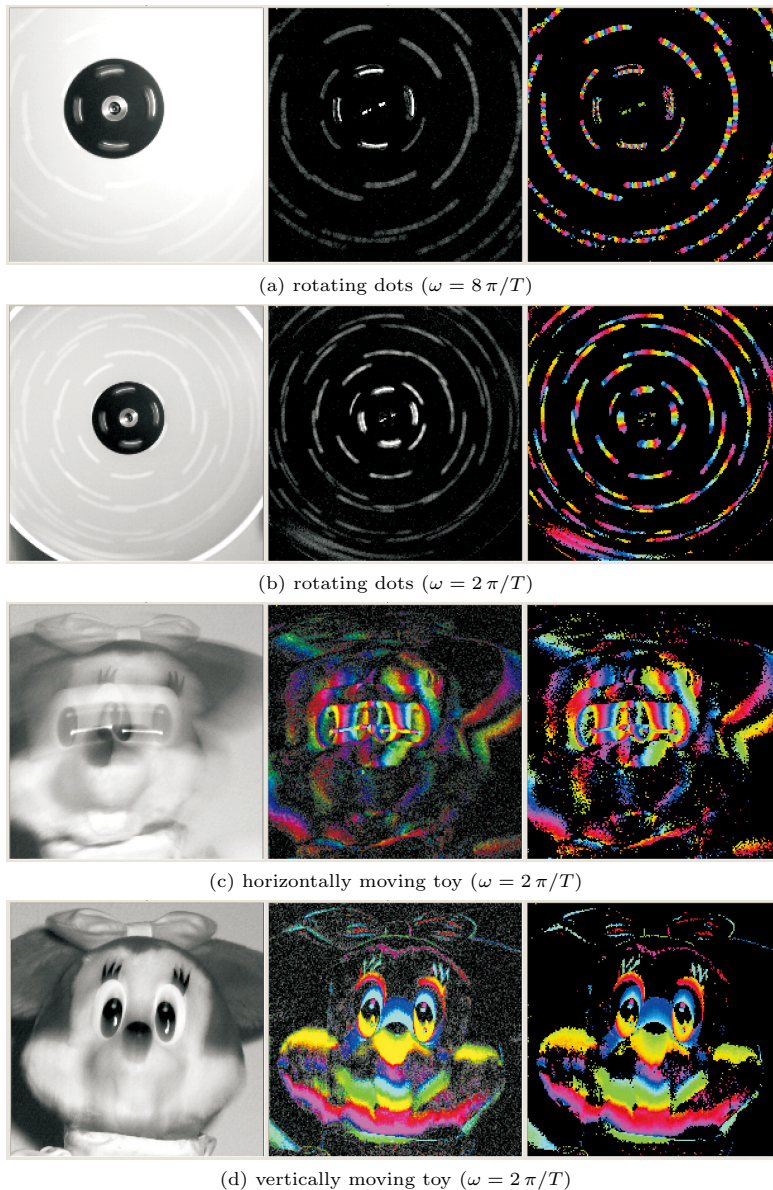


図4 位相スタンプ撮像例。それぞれ、左から強度画像、相関振幅画像、相関位相画像
 Fig.4 Examples of phase stamp imaging. From left to right of each, intensity image, correlation amplitude image, and correlation phase image.

5.2 数値計算法

提案法に残る空間微分の評価には、精度と空間分解能の点で有利な矛盾最小微分演算子¹²⁾を用いた。原理上では単一画素での推定も可能だが、現状のイメージセンサの精度を考えて、近傍画素による局所最小二乗法を採用した。これには解の安定化に加えて開口問題の発生を減らす効果もある。さらに、開口問題の発生を実行時に正規行列の行列式によって判定し、複数の速度場の混在を推定誤差分散を用いて判定する時空

間勾配法の手法^{7),8)}も導入している。

5.2.1 点群の回転運動

用いた画像は図4(a)であり、推定には 3×3 の近傍領域を用いた。回転運動は1枚の画像の中にさまざまな方向と速度の運動を持つ。求めたオプティカルフローを図6(a)に示す。速度は個々の点とその近傍で独立に求まっている。図中の3カ所において軌跡長によりそれぞれ(15, -22) pixel/frame, (30, -44) pixel/frame, (85, -20) pixel/frameの速度を求め、オ

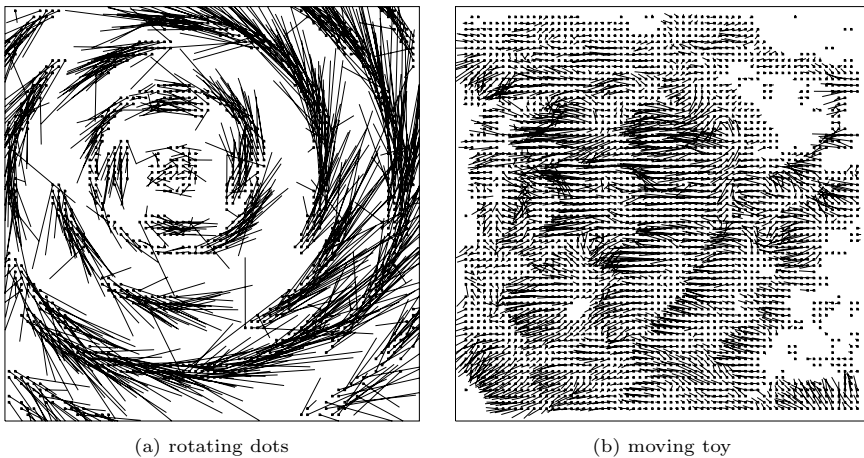


図 6 図 4(a) および (c) に対するオプティカルフロー検出結果
 Fig. 6 Results of optical flow detection for Fig.4(a) and (c).

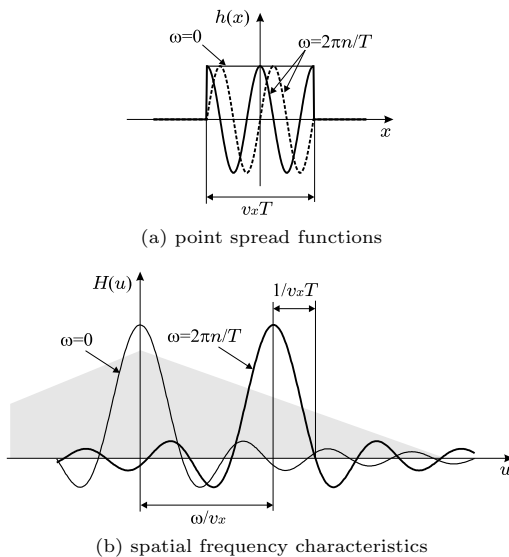


図 5 移動対象の複素正弦波変調撮像における、速度方向の点広がり関数 (a) と空間周波数伝達特性 (b)
 Fig.5 Point spread functions (a) and spatial frequency characteristics (b) in motion direction by means of complex sinusoidally modulated imaging.

プティカルフローの検出結果と比較し、それぞれ 26.6 pixels/frame, 53.3 pixels/frame, 87.3 pixels/frame の結果を得て、誤差が数%以下であることを確認した。従来のオプティカルフロー方程式を用いる方法では、広大な空間平滑化処理をとまなわなければ検出不可能な速度であり、提案法の検出可能速度の大きさと空間分解能の高さが確認できる。

5.2.2 実際のパターンの運動

用いた画像は図 4(c) である。推定には 7×7 の近傍領域を用いた。図 6(b) にその結果を示す。奥行き

の異なるパターンどうしの隠蔽関係の多発とフレーム中での速度の時間変化（目の部分の軌跡の明度の違いを参照）のため、図 6(a) より推定精度は低下している。しかし人形の首のまわりに回転運動するという大局的な速度場はほぼとらえられている。

6. おわりに

本論文では、オプティカルフロー偏微分方程式の荷重積分に基づく新たな代数的厳密解法について述べた。この原理は、時間相関イメージセンサによって同時取得される強度画像と複素正弦波変調画像の組に対してまさに好適であり、単一フレームのみで画素ごとに対象の速度ベクトルを復元でき、差分近似に由来する誤差や速度の制限も除かれ、実時間のオプティカルフロー推定を可能にすることを示した。今後の実用化のためには、デバイスの性能向上と解像度向上が鍵になる。また隠蔽など複雑な運動場での複素正弦波変調撮像の有効活用も、理論上興味ある課題となろう。

時間相関イメージセンサの開発にあたって東京大学 VLSI 設計教育センタならびにシャープ株式会社からいただいた多大な協力に感謝する。

参考文献

- 1) Horn, B.K.P. and Schunck, B.G.: Determining optical flow, *Artificial Intelligence*, Vol.17, pp.185–203 (1981).
- 2) Heeger, D.J.: Model for the extraction of image flow, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.4, No.8, pp.1455–1471 (1987).
- 3) Aggarwal, J.K. and Nandhakumar, N.: On the computation of motion from sequences of im-

- ages — A review, *Proc. IEEE*, Vol.76, No.8, pp.917–935 (1988).
- 4) Fleet, D.J. and Jepson, A.D.: Hierarchical construction of orientation and velocity selective filters, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol.11, No.3, pp.315–325 (1989).
 - 5) Barron, J.L., Fleet, D.J. and Beauchemin, S.S.: Performance of optical flow, *Int. J. Computer Vision*, Vol.12, No.1, pp.43–77 (1994).
 - 6) Lucas, B.D. and Kanade, T.: An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *Proc. 7th IJCAI*, pp.674–679 (1982).
 - 7) 安藤 繁: 画像の時空間微分算法を用いた速度ベクトル分布計測システム, 計測自動制御学会論文誌, Vol.22, No.12, pp.1330–1336 (1986).
 - 8) 安藤 繁: 動画像分類のための微分積和型の特徴抽出演算子, 計測自動制御学会論文誌, Vol.25, No.4, pp.496–503 (1989).
 - 9) Ando, S., Nakamura, K. and Sakaguchi, T.: Ultrafast Correlation Image Sensor, *Proc. IEEE Workshop on CCD and AIS*, Bruges, Belgium (1997).
 - 10) Kimachi, A. and Ando, S.: Time-domain correlation image sensor: Principle and fabrication of optoelectronic demodulator array, *Proc. Int. Conf. Solid-State Devices and Materials*, Tokyo, Japan, pp.108–109 (1999).
 - 11) Ando, S. and Kimachi, A.: Correlation image sensor: Two-dimensional matched detection of amplitude modulated light, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.50, No.10, pp.2059–2066 (2003).
 - 12) Ando, S.: Consistent Gradient Operators, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol.22, No.3, pp.252–265 (2000).
 - 13) Ando, S., Wei, D., Masurel, P. and Kurihara, T.: Complex-sinusoidally modulated imaging for optical flow detection, *SIAM Conference on Imaging Science*, Minneapolis (2006).
 - 14) 魏, 栗原, 安藤: 複素正弦波変調撮像に基づくオプティカルフロー推定, 信学技報, PRMU, 広島 (2005).
 - 15) Masurel, P., Wei, D., Kurihara, T. and Ando, S.: Optical flow evaluation using a correlation image sensor, 信学技報, PRMU, 新潟 (2005).
 - 16) 魏, 栗原, 安藤: 複素正弦波変調撮像に基づく対象の動きによりボケた画像の復元, 信学技報, PRMU, 筑波 (2006).
 - 17) Wei, D., Masurel, P., Kurihara, T. and Ando, S.: Optical flow determination with complex-sinusoidally modulated imaging, *Int. Conf. Signal Processing (ICSP 2006)*, Guilin (2006).
 - 18) Ando, S., Nara, T., Ono, N. and Kurihara, T.:

- Real-time orientation-sensitive magneto-optic imager for leakage flux inspection, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.43, No.3, pp.1044–1051 (2007).
- 19) Kimachi, A.: Real-time heterodyne imaging interferometry: focal-plane amplitude and phase demodulation using a three-phase correlation image sensor, *Applied Optics*, Vol.46, No.1, pp.87–94 (2007).
 - 20) 魏 大比, Masurel, P., 栗原 徹, 安藤 繁: 複素正弦波変調撮像に基づくオプティカルフロー推定, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-D, No.8, pp.2009–2018 (2007).

(平成 19 年 5 月 16 日受付)

(平成 19 年 11 月 21 日採録)

(担当編集委員 八木 康史)



安藤 繁 (正会員)

昭和 25 年生. 昭和 54 年東京大学大学院工学研究科計数工学専攻博士課程修了. 同年東京大学工学部助手, 昭和 55 年より講師, 昭和 59 年より電気通信大学電気通信学部助教授, 昭和 62 年より東京大学工学部助教授, 平成 8 年より同教授, 平成 13 年より同情報理工学系研究科教授. 計測工学, 画像処理, センサ, 音響信号処理等に関する研究に従事. 工学博士. IEEE, ASA, OSA, SIAM, 計測自動制御学会, 電気学会, 応用物理学会各会員.



魏 大比

平成 17 年東京大学大学院数理科学研究科応用数理専攻修士課程修了. 現在, 同大学大学院情報理工学系研究科博士課程在学中. 画像処理に関する基礎的アルゴリズムならびに時間相関イメージセンサを動画像解析に関する研究に従事.



ポール マズレル

Paul Masurel obtained B.E. degree from Ecole Centrale Paris in Oct. 2005, and the master of Information Physics and Computing from the University of Tokyo in 2008, where he studied on a motion blur free imaging system using the correlation image sensor.