

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, 魏 大比, Paul Masurel

東京大学大学院情報理工学系研究科

113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

TEL: 03-5841-(6925,6927,6927)

E-Mail: (ando,dabi,paul)@alab.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし: 本報告では、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、著者らの最新の成果を述べる。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。

キーワード: オプティカルフロー, 偏微分方程式, 複素変調撮像, 時間相関イメージセンサ, 位相スタンプ法

Optical Flow Detection via Sinusoidally Modulated Imaging and Its Realization with Correlation Image Sensor

Shigeru ANDO, Dabi WEI, and Paul MASUREL

Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

TEL: +81-3-5841-(6925,6927,6927)

E-Mail: (ando,dabi,paul)@alab.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract: This article 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.

Keywords: optical flow, partial differential equation, correlation, modulation, phase-stamp method

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。動画像からこのような速度場を推定する方法にはこれまでも数多くの研究がある。特に時空間勾配から推定する方法は、像点の明るさの移動不変性を記述する時空間微分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。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非解析的で近似的な方法にとどまり、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。本報告の主題は、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。

特殊なセンサの開発と応用も画像認識の高性能化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 [8, 7]。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形成される。今回報告する原理は、この原理は、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ピクセル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。

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 $\partial x/\partial t \equiv v_x, \partial y/\partial t \equiv v_y$ と置くことにより、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 ($\partial_x \equiv \partial/\partial x, \partial_y \equiv \partial/\partial y, \partial_t \equiv \partial/\partial t$)。 v_x, v_y は本来は座標の関数でも時間の関数であってもよい。

2.2 オプティカルフロー偏微分方程式の一般解

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。

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

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、(3)式に代入することにより

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

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

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

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と任意明暗パターンの並進速度場との同値関係を意味し、その局所性と合わせて速度測定結果に強い拘束力をもつことを示す。

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ったものであった。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 [2, 3, 5]

$$J(x, y) \equiv \int_{x-X/2}^{x+X/2} \int_{y-Y/2}^{y+Y/2} (v_x f_x + v_y f_y + f_t)^2 dx dy \rightarrow \min \quad (4)$$

と速度場特異性判定 [4, 6]、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、精度の高い推定は困難を極める状況であった。これらは、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、の具体的な表れでもある。

3. 積分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

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t) f(x, y, t) = 0 \quad \forall t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right] \\ \Leftrightarrow \int_{-T/2}^{T/2} \{v_x \partial_x + v_y \partial_y + \partial_t\} f(x, y, t) w(t) dt \quad \forall w(t) \quad (6)$$

に着目する。微分演算子は中括弧内に作用する。具体的には、 $\{w(t)\}$ を $[-T/2, T/2]$ で完備な関数系を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示される（後述）。

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積分し、微分を消去することが可能になる。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 $f(x, y, t)$ 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得るが、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ことに注意する。

3.2 複素正弦波荷重積分型オプティカルフロー方程式

荷重関数として複素正弦関数 $e^{-j\omega t}$ を選ぶ。 $\omega T = 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 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は明らかである。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、

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

のようにすべての荷重周波数 ω において符号を除いて同一となることである。従って

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

および $s_n \equiv (-1)^n$ と置くと、複素正弦波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、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った関係を得る。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、2個の制約条件を与える。従って2個の周波数 ω_1, ω_2 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 $\omega_1 \equiv \omega, \omega_2 = 0$ とすると、 $s_2 = 1$ ゆえ

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

よって

$$(v_x \partial_x + v_y \partial_y)(g_\omega(x, y) - s_n g_0(x, y)) + j\omega g_\omega(x, y) = 0 \quad (12)$$

を得る。この方程式の未知数は v_x, v_y の2個、方程式は複素の2個のため、開口問題の条件（本稿では省略）以外では一意に解くことができる。

4. 時間相関イメージセンサ

4.1 基本構成

相関検出を2次元並列的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気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。

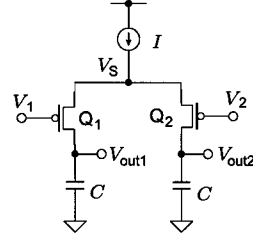


図1: MOSトランジスタを用いた相関回路。コンデンサは初期時刻でリセットし、その後のドレイン電流をコンデンサに蓄積する。ドレイン-ソース間電圧が Q_1, Q_2 が飽和動作を保っている間に読み出し動作を行い、蓄積した電荷を読み出す（破壊読出）と同時に、次の蓄積に備えて電荷をリセットする。

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

$$I = I_0 e^{-\frac{qV_G}{kT}} (e^{\frac{qV_S}{kT}} - e^{\frac{qV_D}{kT}}) \quad (13)$$

と書かれる。 I_0 は、 $V_{GS} = 0$ で V_{DS} が十分に大きい場合（飽和領域動作）のチャネル電流を示す。 $|V_{DS}| \gg |kT/q| \sim 26\text{mV}$ で飽和領域に入り、

$$I = I_0 e^{-\frac{qV_{GS}}{kT}} \quad (14)$$

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、

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= -\frac{qK}{2kT} I (v_1 - v_2) + \frac{1}{2} \left(\frac{qK}{kT}\right)^2 I (v_1^2 - v_2^2) \\ &= -\frac{qK}{2kT} I (v_1 - v_2) \end{aligned} \quad (15)$$

$$I_1 + I_2 = I \quad (16)$$

であり、行列形式に書き換えると

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = -\frac{qK}{2kT} \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} \quad (17)$$

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。

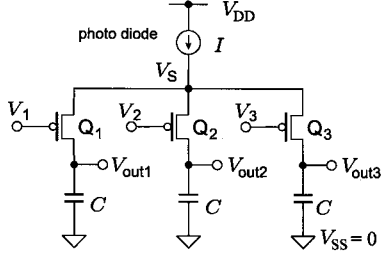


図 2: MOS トランジスタを用いた三相相関回路。

b) MOS 三相相関回路

一度に 2 個の独立信号との相関値を得る三相型では、図 2 のように三対称に構成する。乗算特性は

$$\begin{bmatrix} I_1 - I/3 \\ I_2 - I/3 \\ I_3 - I/3 \end{bmatrix} = -\frac{q\kappa}{3kT} \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \\ I(V_3 - \bar{V}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

のように与えられる。

4.2 最小二乗振幅位相検出

検出すべき信号を

$$f(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (19)$$

とする。位相が互いに $2\pi/3$ 異なる三相正弦波参照信号 ($\cos \omega t, \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}), \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3})$) との相関により、誤差 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) を含む測定値

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} &= \langle f(t) \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \rangle + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \\ &= \frac{A}{2} \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

が得られたとする。誤差の二乗ノルムを評価関数

$$J = \left\{ \frac{A}{2} \cos \phi - g_1 \right\}^2 + \left\{ \frac{A}{2} \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) - g_2 \right\}^2 + \left\{ \frac{A}{2} \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) - g_3 \right\}^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (21)$$

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、

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(g_2 - g_3)}{2g_1 - g_2 - g_3} \right) \quad (22)$$

	Horn	Lucas	OFI
(a)	15.34°	24.60°	21.85°
(b)	41.94°	71.26°	12.18°
(c)	31.14°	46.54°	13.01°

表 1: 平均角度誤差の比較

$$A = \frac{4}{3} \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 - g_1 g_2 - g_2 g_3 - g_3 g_1} \quad (23)$$

$$= \frac{2}{3} \sqrt{(2g_1 - g_2 - g_3)^2 + 3(g_2 - g_3)^2} \quad (24)$$

が得られる。

5. 実験

5.1 標準画像系列を用いたシミュレーション

提案手法の有効性を確認するためにまず、オプティカルフロー標準画像図 3 におけるシミュレーションを行った。左上の図はオプティカルフローの理論値を示している。雲 (a) の動きは右方向に 2.0 pixels/frame, 左下の山の中央部分 (b) は右下方向に 5.7 pixels/frame, 山の左下部分 (c) は右下方向に 11.2 pixels/frame, の速度を持つ。ただし、 x 方向に右、 y 方向に下を正方向とした。離散的に CIS の相関画像の積分をシミュレーションで合成し、3 節で示した理論を適用した。それと従来、OFC を利用する方法 Horn[1], Lucas[2] と比較した。図 3 は計算結果である。また、それぞれはオプティカルフロー理論値との平均角度誤差を計算し、表 1 にまとめた。中速エリア (b) や高速エリア (c) を注目すると、従来で検出するオプティカルフローが精度が悪く、かつ不安定になることに対して、我々は OFI を利用する方法は安定に精度がよく検出することができる。

5.2 実デバイス実験

シミュレーション実験では強度画像や相関画像は離散積分によって構成されるので、これに生じる近似誤差が避けられなかった。我々は実デバイスにおいても実験を行った。モーターを用いて画像パターンを運動させ、これを波形発生器から参照信号を入力した時間相関イメージセンサで撮像することで強度画像/相関画像を取得し実験を行った。また、シミュレーションより更なる高速運動の実験を試みた。

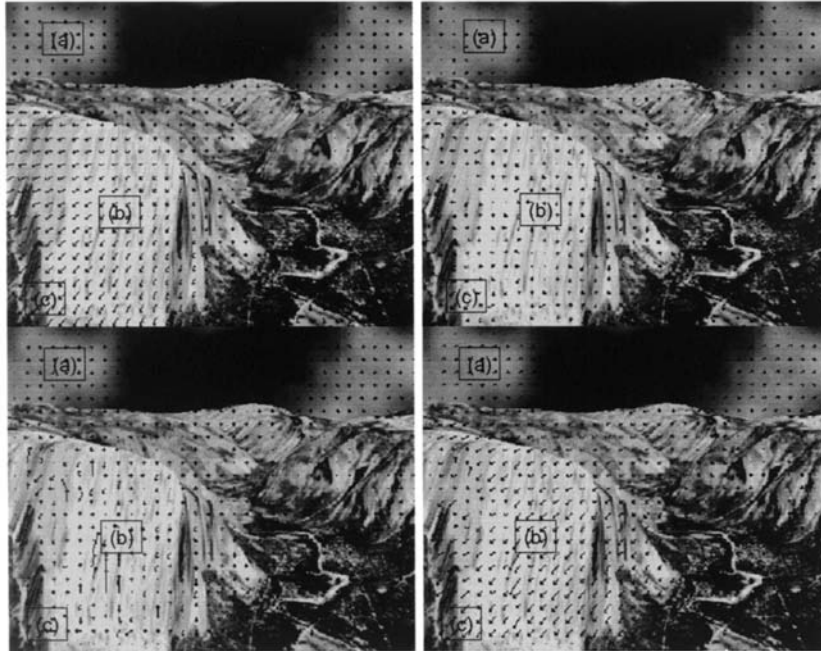


図 3: 左上はオプティカルフロー理論値, 右上は Horn アルゴリズム, 左下は Lucas アルゴリズム, 右下は OFI を利用した方法で計算した結果を示している。

5.2.1 並進運動

人物の写真を並進運動させ、強度画像と相関画像を取得した。図 4 にその結果を示す。左上が強度画像、右上が相関画像の振幅、左下が相関画像の位相を表している、相関画像の振幅が示しているように、背景のところは黒であり、運動する領域だけが相関値を持ち白く表示されている。また、運動方向に相関画像の位相が変わっていくことが確認される。示している対象の運動速度は目測により 21pixel/frame であり、シミュレーション実験の高速エリアより 2 倍もあるが、この速度では従来の方法は適用されないと思われる。提案する手法を適用してみた。その結果を図 4 の右下に示している。検出されたオプティカルフローは正しく、安定して検出された。また、いろんな速度 (3pixel/frame から 25pixel/frame まで) において、平均角度エラーは 10° 前後であることを確認した。

5.2.2 回転運動

更なる高速を実現するために、回転運動を考えた。図 5 のように、平面内で回転運動する対象に対してオプティカルフローの検出実験を行った。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という特徴を有する。回転角速度は一定で、中心との距離により速度が変化する。求めたオプティカルフローを図 5 に示す。図 5 の (a),(b),(c) の三箇所において、目測によりそれぞれ 26.6pixels/frame , 53.3pixels/frame , 87.3pixels/frame であり、4.1 節でのシミュレーション実験の高速領域でのオプティカルフローよりも大きく超えている。この速度では従来の OFC を用いる方法で、オプティカルフローを検出するのは不可能と思われるが、OFI を利用する方法で試みた。その結果 (図 5) を見ると、少数な点を除けば、オプティカルフローベクトル方向は理論値より大きなずれはないのが確認できる。

参考文献

- [1] B. K. P. Horn and B. G. Schunck, "Determining optical flow," *Artificial Intelligence*, vol. 17, pp. 185-203, 1981.
- [2] B. D. Lucas and T. Kanade, "An Iterative Image Registration Technique with an application to stereo vision," *Proc. 7th IJCAI*, pp.674-679, 1982.
- [3] 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集*, vol.22, no.12,

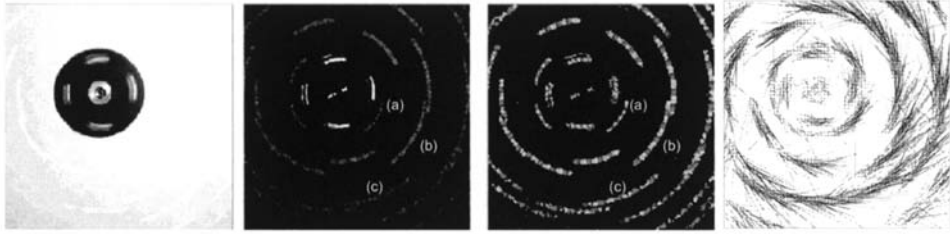


図 5: 左から三枚は、対象が回転するとき、取得した強度画像と相関画像であり、右の一枚は OFI で計算したオプティカルフローを示している。

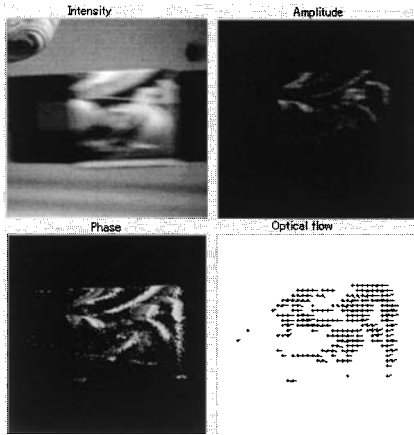


図 4: 並進運動における実験。左上が強度画像，右上が相関画像の振幅，左下が相関画像の位相，右下が検出される速度分布を表している。

	OFC を利用	OFI を利用
1 フレームの画像数	実数 1 枚	実数 3 枚
推定方程式数	実数 1 本	実数 2 本
画素ごとに処理の可能性	不可能	可能
必要なフレーム数	2 フレーム	1 フレーム
時間差分の利用	利用する	利用しない
低速領域	適用可	適用可
高速領域	適用不可	適用可

表 2: OFC を利用する方法 (従来撮像法) と OFI を利用する方法 (複素正弦波変調撮像法) との比較

pp.1330-1336, 1986.

- [4] 安藤 繁, “動画像分類のための微積分型の特徴抽出演算子,” 計測自動制御学会論文集, vol.25, no.4, pp.496-503, 1989.
- [5] 山田裕久, 安藤 繁, “アナログ電子回路運動センサ,” 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.7, pp.729-734, 1991.
- [6] K. Nagao, M. Sohma, K. Kawakami, and S. Ando, “Detecting Contours in Image Sequences,” Trans. IEICE on Information and Systems, vol.E76-D, no.10, pp.1162-1173, 1993.
- [7] S. Ando and A. Kimachi, “Correlation image sensor: Two-dimensional matched detection of amplitude modulated light,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.50, no.10, pp.2059-2066, 2003.
- [8] S. Ando, K. Nakamura, and T. Sakaguchi, “Ultrafast Correlation Image Sensor,” Proc. IEEE Workshop on CCD and AIS, Bruges (Belgium), pp.??-??, 1997.
- [9] S. Ando, K. Nakamura, and T. Sakaguchi, “Ultrafast Correlation Image Sensor,” Proc. Transducers’97, Chicago, pp.307-310, 1997.
- [10] A. Kimachi and S. Ando, “Time-domain correlation image sensor: principle and fabrication of optoelectronic demodulator array,” Proc. Int. Conf. Solid-State Devices and Materials, pp.108-109, Tokyo, Japan, 1999.
- [11] A. Kimachi and S. Ando, “Time-domain correlation image sensor: CMOS design and integration of demodulator pixels,” Optoelectronic Integrated Circuits IV, Proc. SPIE, vol.3950, pp.220-227, San Jose, CA, 2000.
- [12] S. Ando, D. Wei, and P. Masurel, T. Kurihara, “Complex-Sinusoidally Modulated Imaging for Optical Flow Detection,” SIAM Conference on Imaging Science, Minneapolis, 2006.
- [13] 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.
- [14] P. Masurel, D. Wei, T. Kurihara, and S. Ando, “Optical flow evaluation using a correlation image sensor,” 信学技報, PRMU, 新潟, 2005.
- [15] 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.
- [16] 安藤, 栗原, 魏, Paul, “オプティカルフロー偏微分方程式に基づく空間フィルタ速度測定法の理論と厳密法,” 第 23 回センシングフォーラム資料, pp.85-90, 2006.

- [17] 安藤 繁, “1 階偏微分型拘束式に基づく波源定位の方法論,” 日本鉄鋼協会秋期講演大会予稿集 (材料とプロセス 2), pp.922-925, 2006.
- [18] S. Ando and N. Ono, “Partial differential equation (PDE)-based method of sound source localization,” 4th Joint Meeting ASA and ASJ, Honolulu, 2006.
- [19] Y. Fujita, N. Ono, and S. Ando, “Partial-differential-equation-based sound source localization: Finite Fourier integral approach and its application to multiple source localization,” 4th Joint Meeting ASA and ASJ, Honolulu, 2006.
- [20] D. Wei, P. Masurel, T. Kurihara, S. Ando, “Optical flow determination with complex-sinusoidally modulated imaging,” Int. Conf. Signal Processing (ICSP 2006), J096, Guilin, 2006.