Vol.2014-CVIM-190 No.5
2014/1/23

時間相関イメージセンサを用いた高速なオプティカルフローの局所推定

北川 智裕[†1,a)]　大石 剛[†1,b)]　本谷 秀堅[†1,c)]

概要：本稿では，時間相関イメージセンサを利用するオプティカルフロー推定法を，より高速なフロー推定も可能となるように拡張する．時間相関イメージセンサを用いる時，通常のセンサを用いる場合と異なる，各フレーム中の近傍画素値のみを利用することによりオプティカルフローを推定できる．しかし速度が大きくなると，推定問題が縮退する傾向にある．本提案法では，推定問題が縮退する時，センサが計測する時間位相情報を利用することにより，フローの法速度成分を計算する．その計算法と性能評価実験結果について報告する．

1. はじめに

オプティカルフローの算出は基本的に不良設定問題である．これまでに提案されてきたフロー算出法の多くは，対象移動前後の輝度値の不変性をフロー算出の起点とする．輝度値の時間的な不変性より，Horn と Schunk は次に示す線形なオプティカルフロー拘束式を導出した [1].

$$(u\partial_x + v\partial_y + \partial_t)I(x,y,t) = 0 \tag{1}$$

ただし ∂_* は添え字に関する偏微分を表し，$\mathbf{v} = [u,v]^T$ は座標 (x,y) におけるフローベクトルを表す．未知数は各ピクセルにおけるフローベクトル $v = (u,v)$ であり，1 本の拘束式では解を一意に決定する事できない．このことは各点近傍の局所パターンに依存せず成立する事実であり，仮にある点近傍の等輝度線やエッジが直線状ではなくても，輝度値の時間不変性の仮定のみに基づきフローを一意に決定することはできない．

2 次元のフローベクトルを一意に決定するためには，輝度値の不変性以外のフローの特性に基づき解を拘束する必要があり，この拘束のために様々なモデルが提案されてきた．一般にこれらモデルは，カメラにより計測される輝度値に関するモデルではなく，フローベクトルの空間分布に関するモデルであり，空間的に局所的なモデルと大局的なモデルの二つに大別することがきでる．局所的なモデルはフロー場の局所均一性 [4] など各点近傍のフローを拘束することによりフローを決定する手法である．一方の大局的なモデルは画像全体のフロー場の連続性や滑らかさを拘束とする [2]．これらモデルは動画像のフロー場の表現としては概ね妥当であることが多いが，いずれも動画像計測に関わる物理や撮影対象の幾何的特性より導出されたモデルとは言いがたく，特に，高速移動物体が存在する時には成立しにくい．このため高速物体のフロー算出には特徴点を併用するなど，さらに別種のモデルを導入することが多い [3]．本論文では，輝度値の時間不変性のモデルに焦点をあて，時間相関イメージセンサを利用した高速移動物体に対するフロー算出法を提案する．

近年時間相関イメージセンサが Wei らによって提案された [5], [6]．時間相関イメージセンサで撮影された画像を用いることで，オプティカルフロー推定問題を良設定問題として扱うことができる．通常のイメージセンサはシャッター開放中の入射光の積分値によって輝度値を求め，画像を生成する．このため通常のイメージセンサでは，シャッター開放中の入射光の時間変化に関する情報を得ることができない．一方，時間相関イメージセンサを用いると，輝度値だけではなく，入射光と参照信号の相関をとることにより，シャッター開放中の入射光の時間変化に関する情報を得ることができる．文献 [5] においては，時間相関イメージセンサが取得する時間変化に関する情報を利用することにより，各フレームの各ピクセル近傍で取得される計測値だけを利用し，照度不変の仮定のみに基づくことにより，オプティカルフローを算出する手法が提案された．この手法は時間差分計算を必要としないため，フレーム間隔に起因する時間量子化の影響を受けない．また，フローの空間

1 情報処理学会
IPSJ, Chiyoda, Tokyo 101–0062, Japan
†1 現在，名古屋工業大学
Presently with Nagoya Institute of Technology
a) kitagawa@iu.nitech.ac.jp
b) oishi@iu.nitech.ac.jp
c) hontani@nitech.ac.jp

分布に関するモデルを利用しないため，例えば大局的モデルを利用するための最適化演算などが不要であり，実時間でのフロー算出が可能である．

しかしながら，時間相関イメージセンサを用いたとしても，オプティカルフロー算出問題を常に良設定問題にできる訳ではない．例えば，対象物体の移動速度が大きく，得られる輝度画像の動きボケが原因で元画像の輝度勾配情報が欠落するような場合，オプティカルフロー推定問題は不良設定となる．

本稿では，フローが大きい場合のフロー推定手法について述べる．フローの大きさが極めて大きいとき，その推定問題は不良設定となり，一意にフローを決定するためには，従来と同様に計測値以外の情報を必要とする．ここでは，多くの手法（例えば [8]）と同様に，フローのうち対象境界に直交する成分のみを算出する．具体的には，各ピクセルにおいて計測される位相情報の空間勾配を利用する．また，提案法が成立する条件も合わせて明示する．

以下次節から時間相関イメージセンサに関して述べ，２章で本論文のアルゴリズムに関して述べ，３章で実画像実験の結果を述べる．そして４章にて本論文をまとめる．

1.1 時間相関イメージセンサー

動画像を撮影する際のシャッター開放時間を T[s] で表し，シャッターが開放してから閉じるまでの時刻を $t \in [-T/2, T/2]$ で表す．時刻 t においてセンサ上の位置 (x, y) に配置された photo diode における照度を $f(x, y, t)$ で表す．photo diode は $f(x, y, t)$ に比例する電流を出力し，結果として通常の画像センサの位置 (x, y) における輝度値 $I(x, y)$ は次式で表される．

$$I(x, y, T) \propto \int_{-T/2}^{T/2} f(x, y, t)dt \tag{2}$$

上式より明らかなとおり，通常のイメージセンサは，シャッター開放中に各 PD が受光した光量を計測しており，照度 $f(x, y, t)$ の時間変化に関する情報を取得できない．一方，時間相関イメージセンサ (図 1) は，通常のイメージセンサと異なり，外部から供給される参照信号と，$f(x, y, t)$ の時間相関を，各ピクセルにおいて計測することができる．光学計測では，光の強度の時空間分布の振幅と位相に測定対象の重要な情報が含まれることが多く存在する．時間相関イメージセンサを用いると，この振幅と位相を精度よく求めることができ，画像処理に応用することが可能となる．本研究で利用したセンサの概要は表 1 の通りである． 3PCI(3 Phase Correlation Image-sensor) は各ピクセルにおいて，一度に 3 個の独立信号との相関値を計測する．3PCI の乗算特性は以下のように与えられる．i 番目のチャンネルの画素値を I_i，共通ソースを有する差動増幅回路の入力を V_1，V_2，V_3 その平均電圧を $\bar{V}$ とし，ソースを電流 I の被制御電流源とする [5]．このとき $I_1 \sim I_3$ は次式で表される．

図 1 時間相関イメージセンサを用いたロックインカメラ

画像サイズ:390 × 366 画素
画素数:12 × 12 画素サイズ
周波数倍率:∼ 50
三相 1 系統参照信号
CMOS 能動読み出し方式
1 水平期間 450 画素相当 (プリアンサンブル 38 画素，ポストアンサンブル 22 画素)
1 水平線同時リセット (プリアンサンブル部 20 画素目)

表 1 時間相関イメージセンサ概要

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} I(V_1 - \bar{V}) \\ I(V_2 - \bar{V}) \\ I(V_3 - \bar{V}) \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I \\ I \\ I \end{bmatrix}. \tag{3}$$

参照信号として，周波数 ω で初期位相がそれぞれ 0，$2\pi/3$，$4\pi/3$ である 3 相の正弦波信号を入力すると， 3PCI は以下に示す三つの出力を発生する．

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} &= < f(t) \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} f(t) \\ f(t) \\ f(t) \end{bmatrix} > \\ &= \frac{AT}{2} \begin{bmatrix} \cos\phi \\ \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\phi - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} + \frac{BT}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{4}$$

ただし，A，B，ϕ は照度変化 $f(x, y, t)$ を次式のように表したときの係数である．これら各ピクセルの 3 チャンネルの計測値を用いて，$f(x, y, t)$ のバイアス成分は，

$$B = \frac{1}{T}(I_1 + I_2 + I_3). \tag{5}$$

と表される．また，$f(x, y, t)$ の周波数 ω 成分の振幅 A および位相 ϕ は次のように表される．

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}(I_2 - I_3)}{2I_1 - I_2 - I_3}\right), \tag{6}$$

$$A = \frac{2\sqrt{2}}{3}\sqrt{(I_1 - I_2)^2 + (I_2 - I_3)^2 + (I_3 - I_1)^2}. \tag{7}$$

$I_1 \sim I_3$ はセンサにより計測され，A，B，ϕ の計算は計算機上で実時間で行うことができる．時間相関イメージセンサを用いたオプティカルフロー推定法について次に述べる．

1.2 オプティカルフロー恒等式

オプティカルフロー拘束式 (1) が区間 $[-T/2, T/2]$ において一様に成り立っていると仮定する．この時，$w(t)$ を区間 [-T/2,T/2] の任意関数とした時に，以下の恒等関係が成立する．

$$(u\partial_x + v\partial_y + \partial_t)f(x,y,t) = 0, {}^{\forall}t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$$
$$\longleftrightarrow \int_{-T/2}^{T/2} (u\partial_x + v\partial_y + \partial_t)f(x,y,t)w(t)dt, \quad {}^{\forall}w(t). \tag{8}$$

ここで，荷重関数 $w(t)$ を，複素正弦波関数 $e^{-j\omega t}, \omega = 2\pi n/T, n = 0,1,2\cdots$ とすることにより，以下のように時間微分項を消去することが可能である．

$$\int_{-T/2}^{T/2} \{(u\partial_x + v\partial_y)f(x,y,t)\} e^{-j\omega t}dt + \int_{-T/2}^{T/2} \{\partial_t f(x,y,t)\} e^{-j\omega t}dt$$
$$= (u\partial_x + v\partial_y)I_\omega(x,y) + j\omega I_\omega(x,y) + \left[f(x,y,t)e^{-j\omega t}\right]_{-T/2}^{T/2}$$
$$= 0. \tag{9}$$

式 (9) 中に含まれる $I_\omega(x,y)$ は荷重積分項であり，以下のように表される．

$$I_\omega(x,y) \equiv \int_{-T/2}^{T/2} f(x,y,t)e^{-j\omega t}dt. \tag{10}$$

先に述べた通り，$I_\omega(x,y)$ の値は時間相関イメージセンサにより計測できる．一方，式 (9) が含む定積分項 $[f(x,y,t)e^{-j\omega t}]_{-T/2}^{T/2}$ の値は計測できない．しかし $\omega = 0$ の場合を考えることで，定積分値を求める必要がなくなる．$\omega = 0$ を式 (9) に代入すると，強度画像に関する以下の式を得られる．

$$(u\partial_x + v\partial_y)I_0(x,y) + [f(x,y,t)]_{-T/2}^{T/2} = 0. \tag{11}$$

変調周波数 $\omega = 0$ と $\omega \neq 0$ による画像が同時に得られるとして，$\omega T = 2n\pi$ であるため，(11) 式中の積分境界項は

$$\left[f(x,y,t)e^{-j\omega t}\right]_{-T/2}^{T/2} = (-1)^n \left[f(x,y,t)\right]_{-T/2}^{T/2}. \tag{12}$$

と表すことができる．式 (9) と式 (11) を連立させることにより，輝度不変の仮定より式 (13) で表される関係式を得ることが可能である．

$$(u\partial_x + v\partial_y)\{(-1)^n I_0(x,y) - I_\omega(x,y)\} = j\omega I_\omega(x,y). \tag{13}$$

オプティカルフロー恒等式 (13) は，実部と虚部の２本の方程式より成る．なお，$\partial_x I_0(x,y)$，$\partial_x I_\omega(x,y)$ の空間微分は差分で求める．これにより, 各ピクセルにおいて，拘束式を２つ得ることができたので，２つの未知数 (u,v) を一意に決定できる．時間微分項を消去できたことにより，オプティカルフロー拘束式で問題であった差分近似により生じる推定精度の劣化が低減された．

式 (13) は実部と虚部からなるため，次のように書き換えることができる．

$$B\mathbf{v} = \mathbf{d}. \tag{14}$$

ただし

$$B = \begin{bmatrix} \partial_x\{\mathrm{Re}[I_\omega] - (-1)^n I_0\} & \partial_y\{\mathrm{Re}[I_\omega] - (-1)^n I_0\} \\ \partial_x \mathrm{Im}[I_\omega] & \partial_y \mathrm{Im}[I_\omega] \end{bmatrix}, \tag{15}$$

$$\mathbf{v} = [u,v]^T, \tag{16}$$

$$\mathbf{d} = [-\omega\mathrm{Im}[I_\omega], \omega\mathrm{Re}[I_\omega]]^T \tag{17}$$

であり，$\mathrm{Re}[I_\omega]$，$\mathrm{Im}[I_\omega]$ はそれぞれ I_ω の実部，虚部を表す．時間相関イメージセンサによってフローが正しく推定されるためには，$\det B \neq 0$ である必要がある．$\det B \neq 0$ となる条件に関しては，文献 [5] で議論されている．例えば，背景や，移動している対象のテクスチャのない領域では，$f(x,y,t)$ が一定であるため，$I_\omega = 0$ となり，結果として $\det B = 0$ となる．式 (15) より，$\nabla\{\mathrm{Re}[I_\omega] - (-1)^n I_0\}$ と $\nabla \mathrm{Im}[I_\omega]$ が平行であるとき，$\det B = 0$ となることが分かる．このような状況は対象が高速移動しているときに起こりやすい．

2. 提案法

提案法は低速部分は式 (14) を解くことによってフローを推定し，式 (14) が成立しないほど高速な部分は位相 ϕ の空間勾配を用いてフローを推定する．注目ピクセルが低速部分か高速部分かを判断するために，$|\det B|$ と $||\nabla\phi_\omega||$ を用いる．提案法について述べる前に，開口問題と $f(x,y,t)$ の時空間特性について述べる．

2.1 入射光の強度の時空間構造

最初に対象上の一点がシャッター開放中に画像上に描く空間軌道について考察する．式 (10) と式 (14) において，ピクセルの強度画像の輝度値 $I_0(x^*,y^*)$ と相関画像の輝度値 $I_\omega(x^*,y^*)$ は，各ピクセル (x^*,y^*) における時間照度変化 $f(x^*,y^*,t)$，$(t \in [-T/2, T/2])$ によって決定される．この節では，一般性を失うことなく，速度ベクトル $\mathbf{v}$ を $\mathbf{v}(x^*,y^*) = [\bar{u}, 0]^T, (\bar{u} \neq 0)$ と仮定する．また速度ベクトルは $(x^*,y^*,0)$ の局所的な近傍の区間で時空間的に一様であるとする．この時，速度ベクトルの単位は pixel/sec であり，注目ピクセルの対象物体が近傍のピクセルに移動す

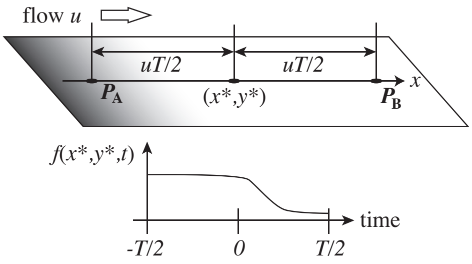


図 2　速度 $\bar{u}$ で移動する点の空間軌道．下のグラフは $f(x^*, y^*, t)$ の空間変化を表す．

るのにかかる時間は $1/\bar{u}$ 秒である．対象物体が $t = 0$ で (x^*, y^*) を通過したとすると次式が成立する．

$$[x(t), y(t)]^T = [\bar{u}t + x^*, y^*]^T. \tag{18}$$

対象物体の空間軌道は 2 点 $P_A = (x^* - \bar{u}T/2, y^*)$，$P_B = (x^* + \bar{u}T/2, y^*)$ を結ぶ線分となる．

$x^* = x(t) - \bar{u}t$ であることを用いると，式 (10) と式 (14) の時間積分を次式のように空間積分に変形できる．

$$I_0(x^*, y^*) = \frac{1}{\bar{u}} \int_{-\bar{u}T/2}^{\bar{u}T/2} f(x^* - s, y^*, 0) ds, \tag{19}$$

$$I_\omega(x^*, y^*) = \frac{1}{\bar{u}} \int_{-\bar{u}T/2}^{\bar{u}T/2} f(x^* - s, y^*, 0) e^{-j\omega s/\bar{u}} ds. \tag{20}$$

ここで，$s = \bar{u}t$ である．$I_0(x, y)$ は $f(x, y, 0)$ とボックスフィルタ $b_u(x)$ の時間畳み込みで得られることが分かる．ただし $b_u(x)$ は

$$b_u(x) = \begin{cases} 1/\bar{u}, & -\bar{u}T/2 \le x \le \bar{u}T/2, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{21}$$

である．この畳み込みは $\bar{u}$ と T に比例する動きボケを表している．また $I_\omega(x, y)$ は $f(x, y, 0)$ と複素正弦波 $g_u(x)$ の時間畳み込みとなる．ただし $g_u(x)$ は

$$g_u(x) = \begin{cases} \bar{u}^{-1} e^{-j\omega x/\bar{u}}, & -\bar{u}T/2 \le x \le \bar{u}T/2, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{22}$$

である．この畳み込みは線分 $\overline{P_A P_B}$ に沿った $f(x, y, 0)$ の断面から空間周波数 $\omega/\bar{u}$ の要素を取り出すものである．

2.2　空間位相と高速フローの推定

式 (1) の微分方程式を時間積分することで，次式を得る．

$$\int_{-T/2}^{T/2} (u\partial_x + v\partial_y + \partial_t) f(x, y, t) dt = (u\partial_x + v\partial_y + \partial_t) I_0(x, y) = 0. \tag{23}$$

$\mathbf{v} = [\bar{u}, 0]^T$ である時，式 (23) は $(\bar{u}\partial_x + \partial_t) f(x, y^*, t) = 0$ となる．ここで，$f(x, y^*, 0)$ が x に関して線形であり，式 (1) や式 (23) が厳密に成立していると仮定する．ここでは $f(x, y^*, 0) = ax + b$ $(a \neq 0)$ であるとし，また単純化のため $\omega = 2\pi n/T$ において $n = 1$ であるとする．この時 $I_0(x, y^*) = (ax + b) \otimes b_u(x) = (ax + b)T/\bar{u}$ であり，$I_\omega(x, y^*) = (ax + b) \otimes g_u(x) = -aT/j\omega$ となる．また，式 (14) は次式のように書き換えることができる．

$$B\boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} aT/\bar{u} & \epsilon \\ 0 & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aT \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{24}$$

ただし，ϵ と δ は拘束式によっては決定されず，任意の値をとりうる．推定したいフロー $\hat{\mathbf{u}} = [\bar{u}, 0]^T$ は $\epsilon \neq 0$ または，$\delta \neq 0$ である時正確に算出できることが分かる．言い換えると，$\partial_y \mathrm{Re}[I_\omega] \neq (-1)^n \partial_y I_0$ または $\partial_y \mathrm{Im}[I_\omega] \neq 0$ である時開口問題は生じない．これらの状況は，I_0 と I_ω の空間勾配が，推定したい真のフローと直交しない時満たされる．

ところで，輝度不変の仮定は次式のように表すことができる．

$$\frac{df}{dt}(x(t), y(t), t) = 0. \tag{25}$$

式 (25) が常に成立していたとしても，フローが大きい時には，式 (14) の解から得られるフローは不正確なものになる．なぜなら大きなフローは $f(x, y, 0)$ の空間的なパターンを大きく平滑化し，この結果，$\mathbf{v} = [\bar{u}, 0]^T$ である時，$\partial_x I_0(x, y) \simeq 0$ となり，式 (15) の $\partial_x I_0(x, y)$ は雑音や量子化の影響で信頼できないものとなるからである．このことは，フローが大きな状況では，通常のオプティカルフローとは異なる，フレーム間の対応など，別の情報が必要となる理由のひとつである．$\partial_x I_0(x, y) \simeq 0$ の場合には，時間相関イメージセンサから得られた画像を用いたとしても，フローの推定は不良設定問題となり，相関画像 I_ω のみが局所的にフローを推定するための情報を持つことになる．

提案法では，大きなフローの法方向の成分を局所的に推定するために，$I_\omega(x, y)$ の位相を用いる．対象の移動速度が大きい場合，上に述べたとおりフロー推定問題が再度不良設定となる．このような場合，フローベクトルの方向を画像の等輝度線や位相の等輝度線に直交する方向に拘束することにより，解を一意に決定することができる [8]．

ここで C によって表される等位相曲線が (x^*, y^*) を通過する場合を考える．ただし，C は $C = \{(x, y) | \phi_\omega(x, y) = \phi_\omega(x^*, y^*)\}$ である．$f(x, y, 0)$ の空間パターンとオプティカルフローの空間分布の整合性が取れていると仮定すると，C は連続しており，滑らかである．そして C 上の隣接する各点で計測される信号 $f(x, y, t)$ は同一のものである．提案法で推定される法方向の速度は等位相曲線 C に直交するオプティカルフロー成分である．

ここで，(x^*, y^*) を通過する等位相曲線に直交する曲線を $\mathcal{T}$ と表すことにする．この曲線 $\mathcal{T}$ は (x^*, y^*) を通過する点の擬似的な軌道である．また，$(x(s), y(s))$ により $\mathcal{T}$ 上の点を表す．ただし，s は $\mathcal{T}$ に沿って測った，(x, y) と (x^*, y^*) の符号付き距離を示す．s の正方向はフローの方向と等しく，s の単位はピクセルであり，$(x(0), y(0)) = (x^*, y^*)$ である．図

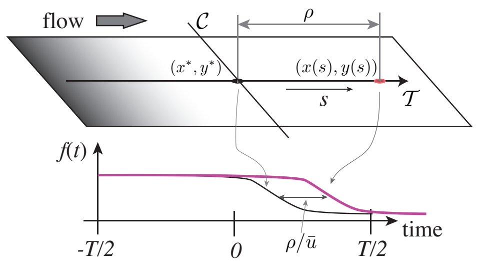


図 3　等位相の曲線 C と，それに直交する曲線 T

3 に示す通り，時間的な信号 $f(x^*, y^*, t)$ ($t \in [-T/2, T/2]$) は $\mathcal{T}$ に沿った入射光の強度の，空間的な断面によって決定される．$\mathcal{T}$ 上の (x^*, y^*) の近傍の点を $(x(\rho), y(\rho))$ として表す．ただし，ρ は (x^*, y^*) からの微小距離を表す．近傍の点 $(x(\rho), y(\rho))$ で，時間が $\rho/\bar{u}$ だけ遅れた $f(x^*, y^*, t)$ と同一の時間的な信号が観測される．この信号は次式で表される．

$$\begin{aligned} f(x(\rho), y(\rho), t) &= f(x^*, y^*, t - \rho/\bar{u}) \\ &= f(x^*, y^*, t) \otimes \delta(t - \rho/\bar{u}). \end{aligned} \tag{26}$$

ここで式 (26) の畳み込みは，空間ではなく，時間に関する演算である．ここで再び次式を示す．

$$\begin{aligned} I_\omega(x^*, y^*) &= A_\omega e^{-j\phi_\omega} \\ &= \int_{-T/2}^{T/2} f(x^*, y^*, t) e^{-j\omega t} dt. \end{aligned} \tag{27}$$

A_ω は振幅を，ϕ_ω は位相を示す．式 (26) を式 (27) で置き換えることにより次式を得る．

$$I_\omega(x(\rho), y(\rho)) = A_\omega e^{-j(\phi_\omega + \rho\omega/\bar{u})}. \tag{28}$$

I_ω の位相は，$\mathcal{T}$ に沿った空間的な距離 ρ と線形に遅れ，その空間勾配は $\partial\phi_\omega/\partial\rho = \omega/\bar{u}$ である．これは，位相の空間勾配 ϕ_ω:$\bar{u}_{\mathrm{norm}} = \{\omega||\nabla\phi_\omega(x, y)||\}^{-1}$ を用いることによって法方向の速度 $\bar{u}_{\mathrm{norm}}$ を推定できることを表している．ただし，∇ は空間勾配を表す演算子である．$-\nabla\phi_\omega$ の方向は等位相の曲線 C に直交する法方向のフローである．結果として法方向のフローの成分 $\mathbf{v}_{\mathrm{norm}}$ は次の式で得られる．

$$\mathbf{v}_{\mathrm{norm}} = -\frac{\nabla\phi_\omega(x, y)}{\omega||\nabla\phi_\omega(x, y)||^2}. \tag{29}$$

しかしながら，式 (29) を用いることで常に法方向の速度を推定できるわけではない．式 (26) は常に成立するが，式 (28) はシャッター開放時間中に限定した時間積分により得られる式である．式 (26) は積分時間が制限されていないが，この積分時間を制限した場合，式 (28) は常に成立するとは限らなくなる．例えば $\mathbf{v} = [\bar{u}, 0]^T$ かつ $f(x, y^*, 0) = ax + b$ であるとき，上述の通り $I_\omega(x, y^*) = aT/j\omega$ となり，$\phi_\omega(x, y^*) = \pi/2$ となる．これは，$||\nabla\phi_\omega|| = 0$ であることを意味し，$f(x, y^*, t)$ が線形のとき，式 (29) ではフローを推定することはできないことが分かる．位相に基づく推定手法は次式が成立するときのみ利用できる．

$$\begin{aligned} & f(x(s+\rho), y(s+\rho), t) \cdot b_T(t) \\ &= \{f(x^*, y^*, t) \cdot b_T(t)\} \otimes \delta(t - \rho/\bar{u}). \end{aligned} \tag{30}$$

ただし，

$$b_T(x) = \begin{cases} 1, & -T/2 \le x \le T/2, \\ 0, & \text{otherwise}. \end{cases} \tag{31}$$

である．条件 (30) は信号の強度 $f(x^*, y^*, t)$ が空間的に局在化している時，よく成立する．例えば，デルタ関数とステップ関数は $|\rho|$ が十分小さい時に式 (30) を満たす．デルタ関数は小さな物体や細い線が高速に通過した時，$f(x^*, y^*, t)$ をうまく近似できる．一方，大きい一様な物体が通過した時は，ステップ関数によって $f(x^*, y^*, t)$ はうまく近似できる．多くの状況で高速物体は各ピクセルで得られる信号を時間的に局在化する．

次節で提案法をまとめる．

2.3 低速部位と高速部位の分離

ここまでに述べた通り，対象物体が高速で移動すると式 (14) の $\mathrm{det}B \simeq 0$ となり，このとき従来のフロー算出法 (式 (14)) を利用できない．ただし，$\mathrm{det}B \simeq 0$ の領域すべてが大きなフローに対応しているわけではない．そこで，式 (29) に従い，フローの法成分を算出し，その値が閾値より大きければフローが実際に大きかったと判断し，その値を用いる．式 (29) より求めた数値が閾値より小さければ，その位置におけるフローは低速であり，先に述べた通り位相勾配では正確なフローを算出できない可能性があるため，従来法によりフローを算出しなおすことにする．手続きを図 4 に示す．

次章では実画像実験の結果を述べる．

3. 実験とその結果

実画像に対して提案法を用いてフローを推定した．時間相関イメージセンサのシャッター開放時間は $T = 1/30$ 秒であり，微分演算子は 3×3 の無矛盾微分演算子 [7] を用いた．また，式 (13) において $n = 1$ とした．撮影した動画像は，時間相関イメージセンサを用いて，メトロノームの針の振れを撮影した．撮影環境を図 5 に示す．提案法では，時間相関イメージセンサで撮影された画像を入力として想定しているため，従来の真値データは利用することができない．そこで本論文では，フローの真値データを手動で作成し，誤差検出のための比較対象として用いた．図 3 は実際にフロー推定の際に用いた，強度画像 $I_0(x, y)$，相関画像の実部 $\mathrm{Re}[I_\omega(x, y)]$，虚部 $\mathrm{Im}[I_\omega(x, y)]$，位相画像 $\phi(x, y)$ である．図 3 に示すように強度画像 $I_0(x, y)$ は針の高速移動によってボケが生じ，フロー推定のための十分な情報を得ることができない．提案法ではフロー推定の際に強度画

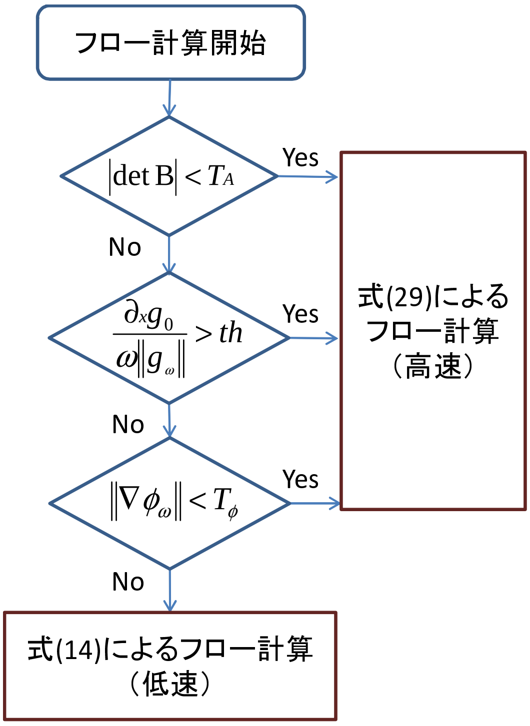


図 4　アルゴリズム

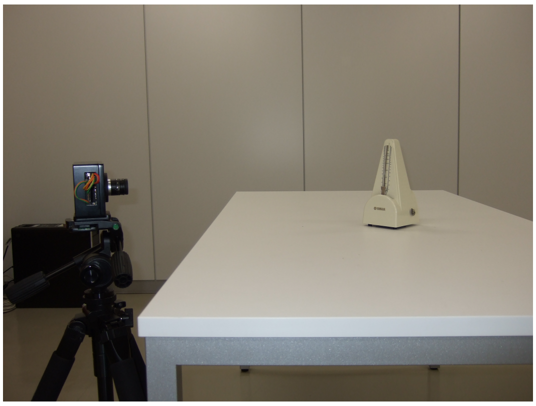
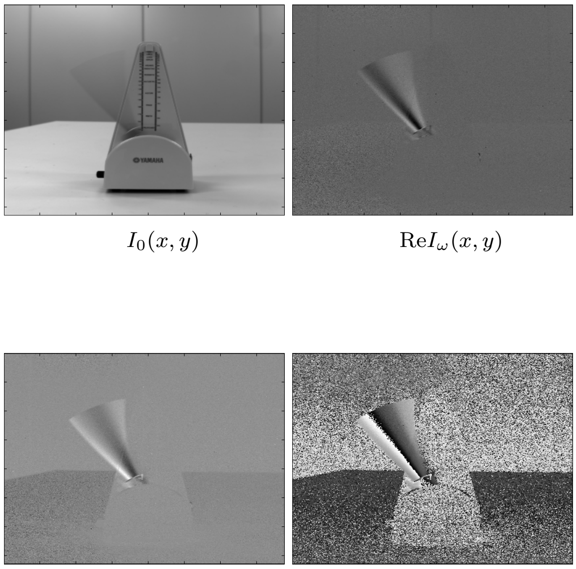


図 5　撮影環境



$I_0(x,y)$　$\mathrm{Re}I_\omega(x,y)$

$\mathrm{Im}I_\omega(x,y)$　$\phi_\omega(x,y)$

図 6　時間相関イメージセンサによって撮影された画像

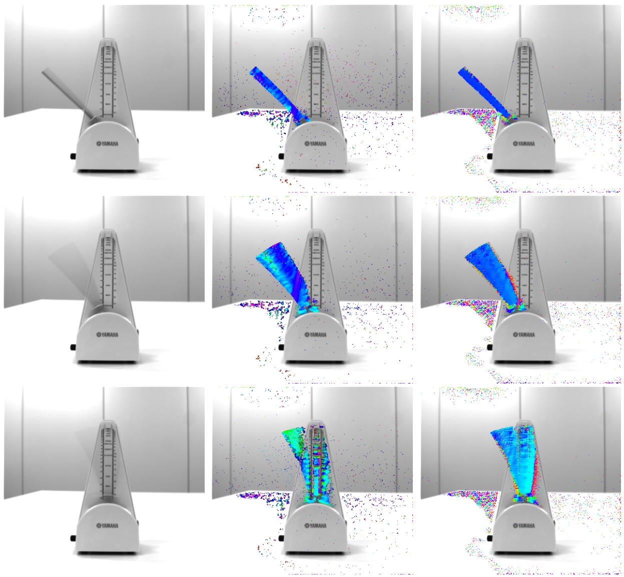


図 7　フローの推定結果．左列：$I_0(x,y)$．中列：従来法によって推定したフロー．右列：提案法によって推定したフロー

像 $I_0(x,y)$ のみでなく，相関画像 $I_\omega(x,y)$ も用いている．また，相関画像 $I_\omega(x,y)$ からは，メトロノームの針の振れによる受光量の変化が測定されていることが分かる．位相画像 $\phi(x,y)$ からは，振り子の針と平行な等位相の曲線が，グレースケールで表示されていることが分かる．

図 7 に推定したフローを示す．推定された方向を色で示し，フローの大きさを明るさで示している．左の列の入力画像に対して，２種類の方法でフローを推定した．１種類は式 (14) を解くことで得られる，時間相関イメージセンサの出力となる従来のフローである．以後，これを従来法と呼ぶ．残りの１種類は提案法のアルゴリズムを用いて，高速部分は式 (29) によって推定したフローである．以後，これを提案法と呼ぶ．中央の列が従来法で推定されたフローを示し，右の列が提案法で推定されたフローを示している．従来法の下段の画像からは，動きボケの影響によってフローが正しく推定されていないことが分かる．これはボケた部分に背景が混ざってしまい，空間勾配を取った時にその影響を強く受けてしまうからである．しかし提案法では，ボケた部分においても，位相勾配が背景の影響を受けず正しく求められているため，式 (29) を用いてフローが正しく推定できている．また，従来法の上段と，提案法の上段に違いが見られない事から，提案法のアルゴリズムから低速部分と高速部分が判別できていることが分かる．

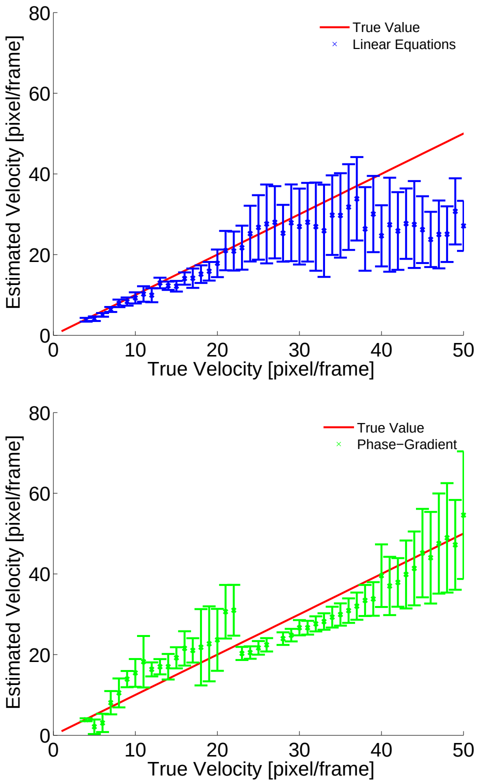


図 8 推定されたフローの分布．上段：従来法の推定結果．下段：提案法の推定結果．

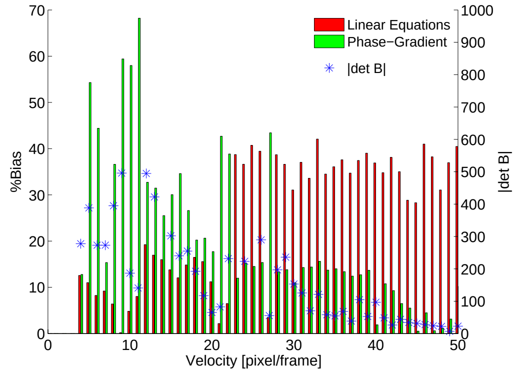


図 9 %bias の比較と $|\mathrm{det}B|$ の平均．左の縦軸が%bias を，右の縦軸が $|\mathrm{det}B|$ の値を表す．赤：従来法の推定結果．緑：提案法の推定結果．

図 8 は従来法と提案法によって推定したフローの結果をグラフとして 2 種類示す．2 種類とも x 軸はフローの真値 $||\bar{\mathbf{v}}||$ を示し，y 軸は推定したフロー $||\hat{\mathbf{v}}||$ を示す．グラフ中の赤線は $||\bar{\mathbf{v}}|| = ||\hat{\mathbf{v}}||$ となる点を示す．グラフ中の点は推定されたフローの平均を示し，その各点から伸びる縦棒の長さは推定されたフローの標準偏差 $\pm\sigma$ を示している．図 8 の上段に表示されているのは従来法によって推定されたフローに関するグラフである．このグラフからは，従来法がフローの真値が大きくなるほど，推定結果が真値から外れていき精度が悪化していることが読み取れる．一方下段は，提案法によって推定されたフローに関するグラフであるが，提案法は真値が大きくなっていっても推定結果が真値から外れておらず精度が維持されていることが分かる．

図 9 のグラフは推定結果の %bias を示している．グラフにおいて，横軸は真値を示しており，左の縦軸は，推定結果の %bias を示している．グラフから，真値が大きい時，従来法で推定したフローに比べ，提案法で推定したフローの精度が高くなっていることが分かる．また，右側の縦軸は $|\mathrm{det}B|$ の値を示し，各真値に対応する $|\mathrm{det}B|$ は青いアスタリスクで示している．真値 $|\mathbf{v}|$ が大きくなるにつれて，$|\mathrm{det}B|$ の値が小さくなっていることが分かる．

図 10 では，テニスをしている人物を撮影した動画像を用いて，推定したフローを示している．左の列は動画像中の 20 フレーム目，右の列は動画像中の 24 フレーム目である．画像の 1 行目は強度画像 $I_0(x, y)$ を示している．20 フレーム目では画像中にボールがあることが確認できる．しかし 24 フレーム目ではラケットでボールを打ったことにより，ボールが高速で移動しているため，画像中からボールを探し出すことができない．24 フレーム目では強度画像からボールは確認できないが，2 行目の位相画像 $\phi(x, y)$ からはそれぞれのボールの位置が分かる．このことから，高速な物体に対しては強度画像を用いるのではなく，位相画像を利用することで，正しいフローが推定できるといえる．また，3 行目と 4 行目は，$|\mathrm{det}B|$ を閾値によって分けた時，各ピクセルがどちらに分類されるかを示している．3 行目は $|\mathrm{det}B| > T_B$ となる部分のフローのみを表示している．この条件は，低速部分でよく成立する．例えば 20 フレーム目のボールは 3 行目で表示されているが，24 フレーム目のボールは表示されていない．一方，4 行目では，$|\mathrm{det}B| < T_B$ かつ $||\nabla\phi_\omega|| < T_\phi$ を満たす部分のみ表示している．この条件は，高速部分でよく成立する．24 フレーム目のボールの軌道が表示されていることから，高速で移動している部分でこの条件がよく成立することが分かる．

4. まとめ

本論文では，時間相関イメージセンサによって得られた相関画像と位相画像を用いて，フローを推定する手法を提案した．時間相関イメージセンサによって撮影された画像が与えられた時，従来の線形方程式を解くだけでは得られなかったフローを推定できることを示した．提案法では，論文内で示したアルゴリズムによって低速部分と高速部分を判別し，低速部分に関しては，時間相関イメージせんさによって得られるフローを用い，高速部分に関しては，位相からフローの大きさを推定した．また実験において，従来法では精度が悪化してしまうほど，対象物体が高速に移動している時，提案法を用いることで精度の悪化を抑え，フローを精度良く推定できることを示した．今後，フロー場の事前知識を組み込んだモデルを利用することによって更なる改善ができることを期待する．

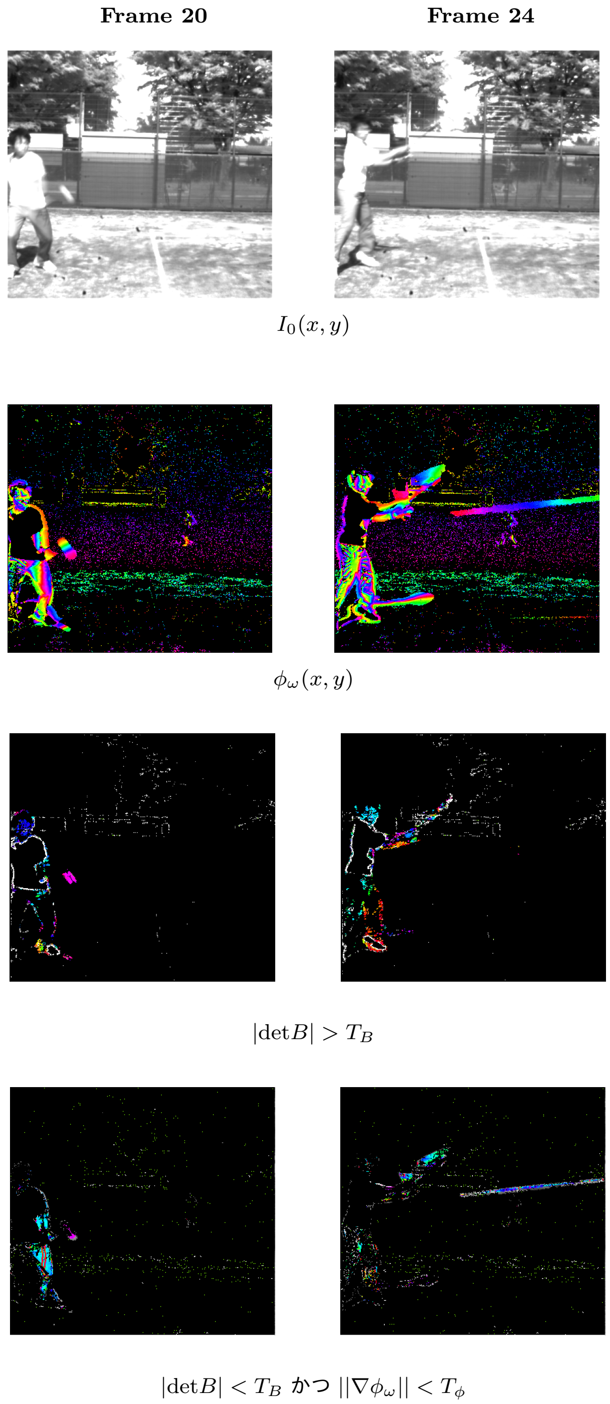


図 10 1 行目：$I_0(x, y)$．2 行目：$\phi_\omega(x, y)$．位相を色によって示している．3 行目：$|\mathrm{det}B| > T_B$ を満たす部分のフロー．低速部分であるためフローの推定は従来法で行った．4 行目：$|\mathrm{det}B| < T_B$ かつ $||\nabla\phi_\omega|| < T_\phi$ を満たす部分のフロー．高速部分であるためフローの推定は提案法で行った．

参考文献

[1] B.K. Horn and B.G.Schunck. Determining optical flow. *Artificial intelligence*, 17(1):185-203, 1981.

[2] Brox, T., Bruhn, A., Papenberg, N., Weickert, J. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping. In *Pajfla, T., Matas, J(G.) (eds.) ECCV 2004*. LNCS, vol.3021,pp.25-36.Springer,Heidelberg,2004.

[3] Thomas Brox, J.Malik. Large Displacement Optical Flow:Descriptor Matching in Variational Motion Estimation. In *IEEE Trans. on PAMI*,2011. 33(3): pp.500-513.

[4] B. D. Lucas, T. Kanade, et al. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *IJCAI*. volume 81 , pages 674-679, 1981.

[5] Ando, S. and Wei, D. Exact algebraic method of optical flow detection via modulated integral imaging theoretical formulation and Real-time Implementation using Correlation Image Sensor. In *VISAPP* 2009 ,pp.480-487

[6] 安藤 繁．魏 大比．ポル マズレル． 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，In *CVIMM 20*, vol.49, No.SIG6 pp.13-21

[7] 安藤繁．自己矛盾を含まない数値微分演算子とその応用 計測自動制御学会論文集，vol.40，No.11， 1/7，(2001)

[8] Fleet, D.J. and Jepson, A.D. 1990. Computation of component image velocity from local phase information. *Intern, J. Comput. Vis.* 5(1):77-104