

1次元オプティカルフローを用いた移動物体の追跡

Moving Object Tracking Based on 1-D Optical Flow

木下浩二*・泉田正則*・村上研二*

Koji KINOSHITA*, Masanori IZUMIDA* and Kenji MURAKAMI*

Abstract: Estimation of the 2-D optical flow by the spatio-temporal method is ill-posed problem. Estimation of the 1-D optical flow is well-posed problem. However, a motion of the object on the image plane is limited in the linear direction along calculation axis of 1-D optical flow. In this paper, we propose a tracking method by spanning the several axes for calculating the 1-D optical flow. Our algorithm has the several parameters which have to be set up. We clarify the relation of the parameters and tracking error by experiment using test image sequence.

key words: moving object tracking, 1-D optical flow, spatio-temporal method, ill-posed problem

1 まえがき

移動物体の検出・追跡技術は、自動車の運転者支援を目的とした車両検出 [1, 2] や、監視カメラによる侵入者の自動検知・追跡システム [3, 4] など、様々な分野で必要とされている。画像系列から移動物体を検出・追跡する代表的な方法として、背景差分法、フレーム間差分法、オプティカルフロー（以後単にフローと呼ぶ）を用いる方法が挙げられる。背景差分法では、移動物体の検出にあらかじめ背景画像が必要で、照明の変化などへの対応が困難とされている。フレーム間差分法では、撮像系が移動する場合には、移動物体と共に背景も変化するために移動物体のみを追跡することは困難である。これらのことを考慮すると、移動物体の追跡にはフローを用いる手法が有効である。

フローを推定する方法として、局所相関法と時空間勾配法がある。前者は、ふたつの異なるフレームの局所画像領域内で絶対差分による相関を計算し、フローを推定する方法である。この方法では安定にフローを推定できるが、演算量が多く実時間処理を行うためには専用のハードウェアを必要とする。一方後者は、画像系列の時間的かつ空間的な濃度変化からフローを推定する方法である。この方法は不良設定問題となりフローを一意に求めることができない。フローの推定方向を1次元に限定すれば、良設定問題となり、一意に解を求めることができる。しかし、追跡できる移動物体の画像上での運動が、1次元フローを求める計算軸に沿った直線運動に制限される。

そこで本論文では、1次元フローの計算軸を移動物体を中心に放射状に複数本張ることで、画像上を2次元運動する移動物体を追跡する方法を提案する。計算軸を複数本張ることにより追跡する移動物体の運動が直線運動に限定されない利点を持つ。提案する手法では、設定すべきパラメータがいくつか存在する。そこで、人工的に画像系列を作成し、追跡誤差とパラメータ値との関係を調べる。1次元フローを用いた処理に文献 [2] および [5] があるが、以下に挙げる点で提案する手法とは異なっている。前者では、後方から接近する車両の検出、つまり直線運動する移動物体の検出のみが行われている。一方後者では、移動方向の推定を行うことのみで1次元フローを用いており、移動物体の検出にはフローを利用していない。

以後、2節で時空間勾配法による2次元および1次元フローの推定法の説明を行い、両者の問題点を述べる。3節で提案する手法の説明を行う。4節で実験結果について述べる。5節で本論文のまとめを行う。以後、 $f(x, y, t)$ で連続画像における点 (x, y) の時刻 t における関数値を、 $f_{i,j,t}$ で離散画像に対する点 (i, j) の時刻 t における関数値を表すものとする。

*松山市文京町3番愛媛大学工学部 情報工学科

*Department of Computer Science, Ehime University, Matsuyama, Japan.

E-mail: {kinoshita, izumida, murakami}@cs.ehime-u.ac.jp

原稿受理 平成16年11月1日

2 オプティカルフロー拘束方程式

本節では、フロー推定の代表的な手法である時空間勾配法について簡単に説明し、その問題点を述べる。画像中の点 (x, y) の、時刻 t における濃度値を $E(x, y, t)$ 、2次元フローを $v(x, y, t) = (u(x, y, t), v(x, y, t))^T$ とする。ただし、 T は転置を表す。微小時間 δt において濃度値は変化しない、すなわち

$$E(x + u\delta t, y + v\delta t, t + \delta t) = E(x, y, t) \quad (1)$$

を仮定する。ただし、 $\delta x = u\delta t, \delta y = v\delta t$ の関係にある。(1)の左辺をテーラー展開し、高次項を無視することで得られる方程式(拘束方程式)

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla E \cdot v = 0 \quad (2)$$

を解くことでフローを推定する。ただし、 $\nabla E = (\partial E/\partial x, \partial E/\partial y)^T$ 。このフロー推定問題は二つの変数に対して方程式が一つであるため、不良設定問題となり解を一意に決定することができない。そこで、フローの空間的な滑らかさに関する仮定を付加することで解を求めている [6]。

一方、1次元直線上の点 ξ の、時刻 t における濃度値を $E(\xi, t)$ 、1次元フローを $v(\xi, t)$ とする。このとき先と同じ仮定のもと、

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} v = 0 \quad (3)$$

なる1次元フローに対する拘束方程式が得られる。そして、この方程式を解くことで1次元フローが推定できる。この問題は良設定問題となり一意に解を決定できる。しかし、1次元フローを用いて移動物体の追跡を行うためには、画像上での移動物体の運動が、計算軸に沿った直線運動に限定されなければならない。

3 1次元フローに基づいた移動物体の検出と追跡処理

フローを用いることで移動物体の画面上での位置と移動方向(以後、両者をあわせて状態と呼ぶ)の推定が可能である。そこで、本節では Fig. 1 に示す上下左右斜めの8方向のうち、推定された移動方向とその両側に1次元フローの計算軸を設定する。そして、各計算軸でのフローの値を用いて画像上を2次元運動する移動物体を追跡する手法を提案する。ただし、静止した撮像系で単一の移動物体を追跡の対象とし、移動物体は急激な方向変化を行わないものとする。

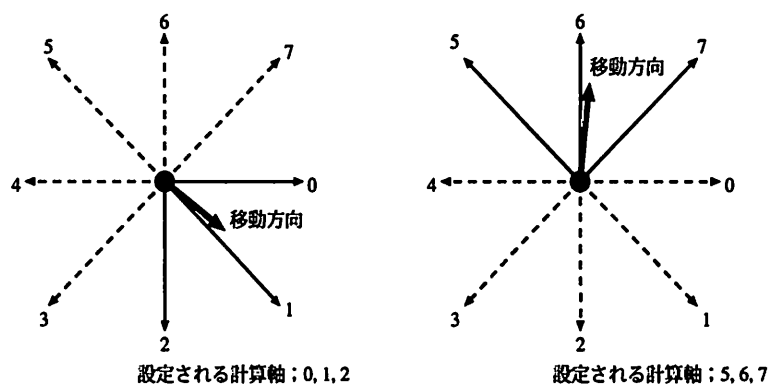


Fig. 1: Direction of the calculation axis

本手法を用いるためには、画面上における移動物体の状態がわかっていなければならない。しかし、処理開始時には、どこに移動物体が存在して、どの方向に運動しているのかはわからない。したがって、処理開始時のみ時空間勾配法を用いて2次元オプティカルフローを推定し初期状態を決定する。一度、移動物体の状態を推定できれば、その状態にしたがって計算軸を逐次設定することで移動物体が追跡できる。

3.1 初期状態の推定

2次元フローを $v_{i,j} = (u_{i,j}, v_{i,j})^T$ としたとき、以下の方法により初期位置 (i_0, j_0) と初期方向 d_0 を推定する。

[初期位置の推定]

撮像系は静止していることから、移動物体が存在しない場所ではフローの値は0である。しかし、撮像系のぶれ等により微小なフローが推定されてしまう。したがって、以下の閾値処理により微小なフローを除去した後、初期位置の推定を行う。まず、閾値 θ_0 を

$$\theta_0 = \max_{\substack{0 \leq i \leq M \\ 0 \leq j \leq N}} \{0.3 \|v_{i,j}\|\}$$

と設定する。ただし、 M, N をそれぞれ縦画素数および横画素数とし、 $\|\cdot\|$ を標準的なノルムとする。次に、 $\theta_0 < \|v_{i,j}\|$ が成立する i, j に対してその重心を求め、それを移動物体の初期位置 (i_0, j_0) とする。

[初期方向の推定]

微小なフローを取り除いた後、フローの平均 $\bar{v} = (\bar{u}, \bar{v})^T$ を求め、各成分の符号をもとに初期方向 d_0 の推定を行う。具体的には、Fig. 1 の方向番号をもとに

$$d_0 = \begin{cases} 1, & \bar{u} \geq 0, \bar{v} > 0 \\ 3, & \bar{u} > 0, \bar{v} \leq 0 \\ 5, & \bar{u} \leq 0, \bar{v} < 0 \\ 7, & \bar{u} < 0, \bar{v} \geq 0 \end{cases}$$

と設定する。ここで、1次元フローの計算には推定された移動方向とその両側に計算軸を設定するため、Fig. 1 に示した奇数番号の方向のみを初期方向とすることで十分である。

3.2 1次元フローを用いた移動物体の検出と追跡

移動物体の大きさが計算軸の間隔に対して小さいときでも追跡が可能のように、各計算軸上にウィンドウを配置する (Fig. 2)。ただし、 d は推定された移動方向、 d^- および d^+ はその両側の方向とする。そして、以下の処理を各計算軸ごとにフレーム間隔 T の間で行う。

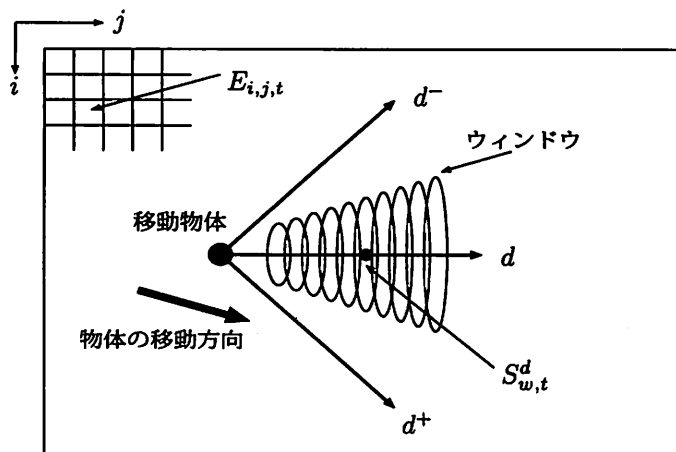


Fig. 2: How to set up the window

[Step 1-1：濃度値の計算]

ウィンドウ中心における濃度値 $S_{w,t}^d$ を以下の式で算出する。

$$S_{w,t}^d = \frac{\sum_{(i,j) \in F_w^d} W_{w[i,j]}^d E_{i,j,t}}{\sum_{(i,j) \in F_w^d} W_{w[i,j]}^d} \quad (4)$$

ただし、 $W_{w[i,j]}^d$ は d 方向、 w 番目のウィンドウにおける重み、 $E_{i,j,t}$ は t フレームにおける (i,j) 画素における濃度値、 F_w^d は d 方向 w 番目のウィンドウを構成する画素を表す。

[Step 1-2：濃度差分値の計算]

濃度の空間差分値 $\Delta_w S_{w,t}^d$ および時間差分値 $\Delta_t S_{w,t}^d$ を次式で計算する。

$$\Delta_w S_{w,t}^d = \frac{S_{w+1,t}^d - S_{w,t}^d + S_{w+1,t+1}^d - S_{w,t+1}^d}{2} \quad (5)$$

$$\Delta_t S_{w,t}^d = \frac{S_{w+1,t+1}^d - S_{w+1,t}^d + S_{w,t+1}^d - S_{w,t}^d}{2} \quad (6)$$

[Step 1-3：1次元フローの計算]

物体が存在すれば空間差分値は大きくなるので、

$$|\Delta_w S_{w,t}^d| < \theta_1$$

が成立するところでは移動物体が存在しないとし $v_{w,t}^d = 0$ とする。それ以外ところで

$$v_{w,t}^d = -\frac{\Delta_t S_{w,t}^d}{\Delta_w S_{w,t}^d} \quad (7)$$

により1次元フローを計算する。

[Step 1-4：フローの投票]

計算軸に沿って物体が移動していれば正のフローが計算される。そこで各計算軸に投票箱 Q^d を設置し、もし $v_{w,t}^d > 0$ なら Q^d に1加算する。

以上のフローの計算および投票を T フレーム間行い、その結果を用いて次の状態を推定する。

[Step 2-1：移動方向の推定]

移動物体が急激な方向変化を行わないことから、投票数が最も多い方向を次の移動方向 d^* とする。すなわち

$$d^* = \operatorname{argmax} \{Q^d; d = d^-, d, d^+\} \quad (8)$$

[Step 2-2：位置の推定]

推定された次の移動方向 d^* の、正のフローが計算されたウィンドウ番号の平均値 \bar{w} 、正のフローの平均 \bar{v}^{d^*} を T フレームごとに計算する。次の時刻において移動物体の存在が推定されるウィンドウ番号を $\bar{w} + \bar{v}^{d^*}$ として求め、その中心座標を次の移動物体の位置とする。

推定された状態をもとに再び3本の計算軸を張り、フローの計算や投票を繰り返すことで移動物体の追跡を行う。

4 実験

本手法では、ウィンドウサイズや重みの値など設定すべきパラメータがいくつか存在する。そこで、縦240画素、横320画素、300フレームで構成される画像系列を作成し、ウィンドウのパラメータと追跡誤差との関係を調べる。紙面の都合上、全てについて詳細に報告はできないが、実験条件と結果の一部を記す。

楕円形のウィンドウを各計算軸に10個設置し、ウィンドウ中心の間隔を3 pixelする。Fig. 3に示すようにウィンドウ番号 w における短軸および長軸をそれぞれ a_w および b_w とし、 $a_w = 1, 2, 3$ および $b_w = w + 3, w + 4, w + 5 (w = 1, \dots, 10)$ の9種類用意した。濃度値計算の際の重みは、標準偏差が長軸・短軸と同一のガウス分布状 (Case 1) と、標準偏差が長軸・短軸の半分となるガウス分布状 (Case 2) と、一様分布状の重み (ウィンドウ内の濃度値の平均を計算; Case 3) とする。

半径5 pixelの円形の移動物体の中心座標 (i, j) が

$$i = 120 - 100 \sin(3\pi t/300) + 120$$

$$j = 10 + t$$

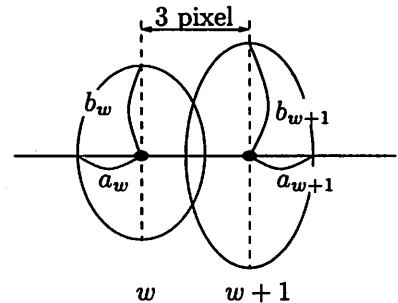


Fig. 3: Parameters of the window

で表される画像系列に対する、最大追跡誤差を Table. 1 に示す。ただし、 t はフレーム数である。

Table. 1: Maximum tracking error (pixel)

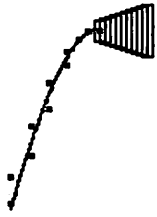
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
	$b_w = w + 3$			$b_w = w + 4$			$b_w = w + 5$		
$a_w = 1$	8.60	10.0	8.49	8.94	10.6	7.81	10.0	9.00	10.0
$a_w = 2$	9.22	8.06	7.81	9.22	11.3	8.06	9.22	9.22	8.60
$a_w = 3$	8.49	8.06	7.81	8.06	8.06	8.06	10.6	8.25	8.06

また、Fig. 4に50, 100, 150, 200, 250, 300フレームにおける追跡結果を示す。なお、実線が移動物体の中心座標の軌跡を、ドットで5フレームごとの中心座標の推定結果を示している。また、推定された移動方向に設置される10個のウィンドウを表示した (実際には推定された移動方向の両側にもウィンドウが設置される)。

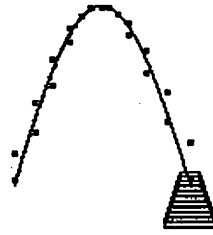
さまざまな形状および運動を行う移動物体に対して実験を行った結果、追跡に成功している場合には、ウィンドウサイズや重みの種類による追跡誤差の違いはあまり見られなかった。しかし、ウィンドウの長軸および短軸に比べて標準偏差が小さいガウス状の重みを設定した場合、小さな移動物体がウィンドウの端に位置すると、濃度変化を十分に検出することができず、追跡に失敗することもある。また、ウィンドウサイズが小さ過ぎ、隣接するウィンドウとの間に隙間が存在すると、追跡に失敗することもある。したがって、ウィンドウサイズに関しては、隙間が存在しないよう隣接するウィンドウ間で多少の重なりを持たせ、重みに関しては、計算効率の観点から単純なウィンドウ内平均を計算する方法が妥当であると思われる。

5 むすび

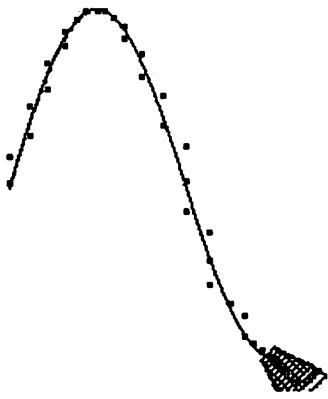
本論文では、推定された移動方向を中心に1次元フローの計算軸を放射状に張ることにより、画像上で2次元運動する移動物体の追跡法を提案した。そして、人工的に作成した画像系列を用いて、提案法の有効性およびウィンドウの各種パラメータと追跡誤差の関係を調べた。



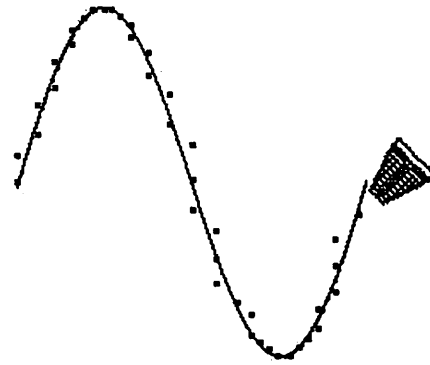
(a) frame = 50



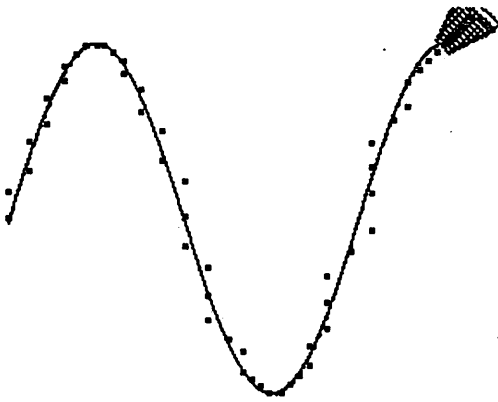
(b) frame = 100



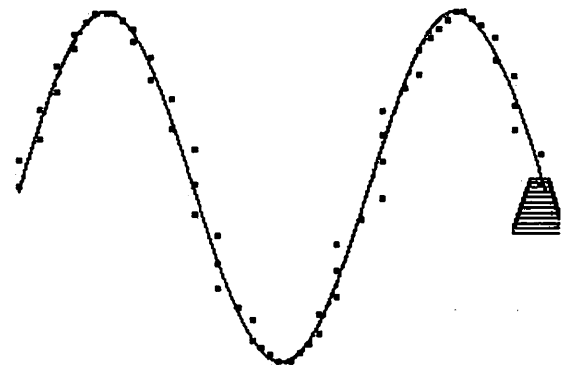
(c) frame = 150



(d) frame = 200



(e) frame = 250



(f) frame = 300

Fig. 4: Tracking result

ウィンドウサイズに比べて、移動物体が大きすぎるときや小さすぎるときには追跡に失敗することがあるもの、本手法において、追跡誤差に対するウィンドウの各種パラメータの影響は少ないものと思われる。したがって、ウィンドウサイズに関しては、隙間が存在しないよう隣接するウィンドウ間で多少の重なりを持たせ、重みに関しては、計算効率の観点から単純なウィンドウ内平均を計算する方法が妥当であると思われる。また、画像の一部のみに着目してフローを算出し、かつ文献 [6] のようにフローの推定に反復法を用いていないことから、処理時間の短縮が可能であることは明らかである。

今回、固定した撮像系で単一の移動物体の追跡法を提案したが、文献 [7] で一定の角速度で回転する撮像系に対し本手法を応用した移動物体の追跡法が提案されている。そこで今後の課題として、より一般的な移動を行う撮像系での追跡法の開発や、複数の移動物体が存在し追跡対象が隠蔽される場合の対策などがあげられる。

参考文献

- [1] S. Ozawa, "Image Processing for Intelligent Transport Systems," IEICE Trans. Inf. and Syst., vol.E82-D, no.3, 1999.
- [2] 太田直哉, 新島和孝, "人工昆虫視覚による後方接近車両の検出," 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.8, pp.1589-1596, 2001.
- [3] 長井敦, 久野義徳, 白井良明, "複雑変動背景下における移動物体の検出," 信学論 (D-II), vol.J80-D-II, no.5, pp.1086-1095, 1997.
- [4] 森田俊彦, "局所相関演算による動きの検出と追跡," 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.2, pp.299-309, 2001.
- [5] 片山壽二, 杉山岳弘, 阿部圭一, "1次元オプティカルフローに基づく移動物体の方向の推定," 情報学研報, 02-CVIM-133-4, pp.25-32, May 2002.
- [6] B.K.P. Horn, "Robot Vision," MTI Press, 1986.
- [7] 榎谷正也, 木下浩二, 村上研二, 泉田正則, "運動する観測系における限定方向オプティカルフローを用いた移動物体の追跡に関する研究, 電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, p. 263, Sep. 2004.