

エッジベースオプティカルフロー検出の性能向上の検討

井上 哲理¹・山際勝也²・関靖夫¹

1 情報工学科

2 (株)富士通(本学工学研究科情報工学専攻平成8年3月修了)

Performance Improvement for Edge-Based Optical Flow Detection

Tetsuri INOUE¹⁾, Katsuya YAMAGIWA²⁾, Yasuo SEKI¹⁾

Abstract

This study improves the performance of the edge-based optical flow detection method which has been proposed in our previous study. The previous method detects optical flow iteratively for the object moving at high speed. The experiments showed the method is superior to the conventional gradient-based method in detecting optical flows of objects moving at high speed, while the precision of the optical flow is insufficient. This method requires equal edge intensity in addition to equal luminous intensity for the point connected by the optical flow. The additional requirement is that the difference of the spacial gradient at the edge points between the two images should be minimized. The experiments showed that the method is effective for optical flow detection for the objects of moving in parallel at high speed.

Key Words: Dynamic vision, Optical flow, Edge-base, Gradient method

1. はじめに

動画像において各画素点の移動方向と移動距離を表す速度ベクトルの場合であるオプティカルフローの検出は、動画像処理の重要な処理のひとつである。オプティカルフローの検出法としては勾配法¹⁾が有効な方法であるが、同方法には移動量が大きい対象ではオプティカルフローの検出が十分にできず、また処理時間もかかるという問題点がある。この問題を解決する目的で、我々は対象画像にボカシ処理を行うことで高速移動物体のオプティカルフロー検出を可能にする方法および処理の高速化をはかるために対象画像のエッジ線のみ処理を施す方法を以前提案した²⁾。

提案方法に基づく実験結果より、対象画像にボカシ処理を施さない従来の方法にくらべて、高速移動物体に対するオプティカルフロー検出能力の向上および処理時間の短縮が確認された。しかし、オプティカルフロー検出結果を詳細に検討したところ精度の面で十分でない場合があることが分かった。

本研究では、検出精度が不十分な箇所の精度を向上することを目的としている。すでに提案した処理画像にボカシ処理を施すオプティカルフロー検出法にエッジ強度の一致性という新たな拘束条件を追加することにより、高精度なオプティカルフローの検出を検討する。エッジ強度の一致性とは、2枚の処理画像の各対応するエッジ

点での空間的勾配の差が最小になるような条件である。この新たな拘束条件をボカシ処理を用いたグラディエント法¹⁾に追加することにより、より精度の高いオプティカルフローの検出を実現することを、本研究でめざした。

2. 検出精度向上の検討

2.1 問題点の解析

以前提案したボカシ処理を用いたグラディエント法²⁾により、高速移動物体のオプティカルフロー検出が可能となった。しかし詳細な検討を行ったところ、検出精度の点で不十分な部分が存在した。さまざまな画像により実験を行い、その原因を検討した結果、次の理由が挙げられた。

図1は、これまでのオプティカルフロー算出における輝度の一致及びオプティカルフロー場の平滑性の2つの拘束条件だけでは、対応しない点 p での誤った検出状況を示している。図1で記されている点 p がグラディエント法の繰り返し演算の途中で、実際の物体点の動きを反映していない点 p' に対応したとすると、従来のふたつの拘束条件では点 p' 付近で点 p と同輝度の誤った点 p'' に対応してしまう可能性がある。

この誤対応の可能性のある点が多ければ、それだけ検出精度が低下していることになる。従って、この誤った状

況点を減少させる事ができれば精度向上につながる。

2.2 エッジ強度一致の拘束条件

本研究ではエッジ点での勾配の一致の拘束条件をボカシ処理を用いたグラディエント法に追加することでこの問題を解決することを考えた。

図2はエッジ点における勾配の一致性を追加したグラディエント法の対応状況を示している。図2で記されている点qがグラディエント法の繰り返し演算の途中で、実際の物体点の動きを反映していない点q'に対応したとする。エッジ点での勾配の一致という新たな拘束条件の追加により点qと点q'における勾配fx及びfx'が比較される。ここで差違が生じるときには、差違が最小になるような点が求まるように従来のグラディエント法に影響を与える。この影響によりエッジ点での勾配が一致する点を算出する。図2の場合は点qでの勾配fxと同勾配の点q'が求まることになる。本手法によりオプティカルフローの検出精度の向上が期待される。次項で本手法の基本式の導出を行う。

2.3 エッジ強度一致を含めたグラディエント法の導出

本手法で扱う三つの拘束条件である輝度保存性、オプティカルフロー場の平滑性及びエッジ点での勾配の一致性を式(1)として表す。

$$e = e_0 + \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2 \tag{1}$$

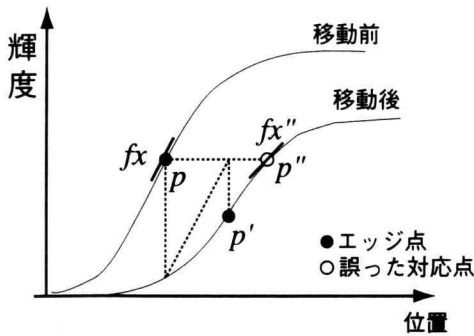


図1 誤ったエッジ点の対応状況

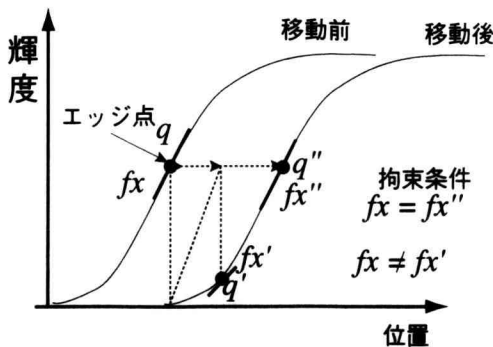


図2 エッジ強度一致の拘束条件によるエッジ点の対応状況

但し、 λ_1 はオプティカルフロー場をより滑らかにする変数であり、 λ_2 は式に対するエッジ点での勾配の一致性の影響を可変させる変数である。輝度保存の誤差 e_0 及びオプティカルフロー場の平滑性の誤差 e_1 は、すでに提案した方法における定義と同じものである(文献2参照)。またフレーム間におけるエッジ点での勾配の一致性を示す誤差 e_2 は次式(2)で表すことが可能である。

$$e_2 \equiv \sum_{(i,j) \in I \cap e} \left[\left\langle f_x \{ i+u(i,j,k), j+v(i,j,k), k \} - f_x(i,j,k) \right\rangle^2 + \left\langle f_y \{ i+u(i,j,k), j+v(i,j,k), k+1 \} - f_y(i,j,k) \right\rangle^2 \right] \tag{2}$$

式(1)のeが最小になるようなオプティカルフローの成分(u,v)を求めればよい。

ここで式(1)をu(i,j,k)及びv(i,j,k)についてそれぞれ偏微分すると式(3)及び(4)が求まる。

$$f_x \{ u(i,j,k) f_x + v(i,j,k) f_y + f_i \} + \lambda_1 \{ a(i,j,k) u(i,j,k) - \tilde{u}(i,j,k) \} + \lambda_2 \{ f_{xx} (f_x - \tilde{f}_x) + f_{yx} (f_y - \tilde{f}_y) \} = 0 \tag{3}$$

$$f_y \{ u(i,j,k) f_x + v(i,j,k) f_y + f_i \} + \lambda_1 \{ a(i,j,k) v(i,j,k) - \tilde{v}(i,j,k) \} + \lambda_2 \{ f_{xy} (f_x - \tilde{f}_x) + f_{yy} (f_y - \tilde{f}_y) \} = 0 \tag{4}$$

但し、

- $f_x: f_x(i,j,k)$, $f_y: f_y(i,j,k)$, $f_i: f(i,j,k)$
- $\tilde{f}_x: f_x \{ i+u(i,j,k), j+v(i,j,k), k+1 \}$
- $\tilde{f}_y: f_y \{ i+u(i,j,k), j+v(i,j,k), k+1 \}$
- $f_{xx}: f_x$ をxで偏微分したもの
- $f_{xy}: f_x$ をyで偏微分したもの
- $f_{yx}: f_y$ をxで偏微分したもの
- $f_{yy}: f_y$ をyで偏微分したもの

であり、また

$$\tilde{u}(i,j,k) \equiv \frac{1}{2} \sum_{(r,j) \in N_{8e}(i,j,k)} \left\{ \frac{1}{n_n(i,j,k)} + \frac{1}{n_n(i',j',k)} \right\} u(i',j',k) \tag{5}$$

$$\tilde{v}(i,j,k) \equiv \frac{1}{2} \sum_{(r,j) \in N_{8e}(i,j,k)} \left\{ \frac{1}{n_n(i,j,k)} + \frac{1}{n_n(i',j',k)} \right\} v(i',j',k) \tag{6}$$

$$a(i,j,k) \equiv \frac{|N_{8e}(i,j,k)|}{2n_n(i,j,k)} \sum_{(r,j) \in N_{8e}(i,j,k)} \frac{1}{2n_n(i',j',k)} \tag{7}$$

で定義される。

なお空間的及び時間的勾配 f'_x, f'_y, f'_t は、すでに提案した方法と同じものを用いる(文献2参照)。また前述した f'_{xx} 及び f'_{yy} は空間勾配 f'_x を、 f'_{xy} 及び f'_{yy} は空間勾配 f'_y をそれぞれ x 及び y で偏微分した変数であり、次式で表すことが可能である。

$$f'_{xx} = \frac{1}{\sigma_d^2} \sum_{(i',j') \in W(i+u(i,j,k), j+v(i,j,k); w)} \left[1 - \frac{\{i+u(i,j,k)-i'\}^2}{\sigma_d^2} \right] \times G\{i+u(i,j,k)-i', j+v(i,j,k); \sigma_d\} f(i',j',k) \quad (8)$$

$$f'_{xy} = \frac{1}{\sigma_d^2} \sum_{(i',j') \in W(i+u(i,j,k), j+v(i,j,k); w)} \{i+u(i,j,k)-i'\} \{j+v(i,j,k)-j'\} \times G\{i+u(i,j,k)-i', j+v(i,j,k); \sigma_d\} f(i',j',k) \quad (9)$$

$$f'_{yx} = \frac{1}{\sigma_d^2} \sum_{(i',j') \in W(i+u(i,j,k), j+v(i,j,k); w)} \{j+v(i,j,k)-j'\} \{i+u(i,j,k)-i'\} \times G\{i+u(i,j,k)-i', j+v(i,j,k); \sigma_d\} f(i',j',k) \quad (10)$$

$$f'_{yy} = \frac{1}{\sigma_d^2} \sum_{(i',j') \in W(i+u(i,j,k), j+v(i,j,k); w)} \left[1 - \frac{\{j+v(i,j,k)-j'\}^2}{\sigma_d^2} \right] \times G\{i+u(i,j,k)-i', j+v(i,j,k); \sigma_d\} f(i',j',k) \quad (11)$$

但し、 σ_d はボカシの度合い変数、 W は加重平均をとる範囲変数である。

式(3)及び(4)を整理すると次式(12)及び(13)が導出できる。

$$\{a(i,j,k)\lambda_1 + f_x^2\} u(i,j,k) + f_x f_y v(i,j,k) = \lambda_1 \bar{u}(i,j,k) - (f_x f_t + \lambda_2 a) \quad (12)$$

$$f_x f_y u(i,j,k) + \{a(i,j,k)\lambda_1 + f_y^2\} v(i,j,k) + = \lambda_1 \bar{v}(i,j,k) - (f_y f_t + \lambda_2 b) \quad (13)$$

但し、

$$a \equiv f'_{xx}(f'_x - f_x) + f'_{yx}(f'_y - f_y) \quad (14)$$

$$b \equiv f'_{xy}(f'_x - f_x) + f'_{yy}(f'_y - f_y) \quad (15)$$

と置換する。

式(12)及び(13)を $u(i,j,k)$ 及び $v(i,j,k)$ に関する連立方程式と考え、 $\lambda_2 \neq 0$ のとき次式(16)及び(17)が導出される。

$$u(i,j,k) = \bar{u}(i,j,k) - \frac{1}{\lambda_1 \{a(i,j,k)\lambda_1 + f_x^2 + f_y^2\}} \left(\lambda_1 \{ \bar{u}(i,j,k) f_x + \bar{v}(i,j,k) f_y + f_t \} f_x + \lambda_2 [\{ a(i,j,k)\lambda_1 + f_y^2 \} \bar{a} - f_x f_y \bar{b}] \right) \quad (16)$$

$$v(i,j,k) = \bar{v}(i,j,k) - \frac{1}{\lambda_1 \{a(i,j,k)\lambda_1 + f_x^2 + f_y^2\}} \left(\lambda_1 \{ \bar{u}(i,j,k) f_x + \bar{v}(i,j,k) f_y + f_t \} f_y + \lambda_2 [\{ a(i,j,k)\lambda_1 + f_x^2 \} \bar{b} - f_x f_y \bar{a}] \right) \quad (17)$$

但し、

$$\bar{u}(i,j,k) \equiv \frac{\bar{u}(i,j,k)}{a(i,j,k)}, \quad \bar{v}(i,j,k) \equiv \frac{\bar{v}(i,j,k)}{a(i,j,k)} \quad (18)$$

$$\bar{a} \equiv \frac{a}{a(i,j,k)}, \quad \bar{b} \equiv \frac{b}{a(i,j,k)}$$

と置換する。

上式を反復式の形に変形すると次式(19)及び(20)が導出される。

$$u^{l+1}(i,j,k) = \bar{u}^l(i,j,k) - \frac{1}{\lambda_1 \{a(i,j,k)\lambda_1 + f_x^2 + f_y^2\}} \left(\lambda_1 \{ \bar{u}^l(i,j,k) f_x + \bar{v}^l(i,j,k) f_y + f_t \} f_x + \lambda_2 [\{ a(i,j,k)\lambda_1 + f_y^2 \} \bar{a}^l - f_x f_y \bar{b}^l] \right) \quad (19)$$

$$v^{l+1}(i,j,k) = \bar{v}^l(i,j,k) - \frac{1}{\lambda_1 \{a(i,j,k)\lambda_1 + f_x^2 + f_y^2\}} \left(\lambda_1 \{ \bar{u}^l(i,j,k) f_x + \bar{v}^l(i,j,k) f_y + f_t \} f_y + \lambda_2 [\{ a(i,j,k)\lambda_1 + f_x^2 \} \bar{b}^l - f_x f_y \bar{a}^l] \right) \quad (20)$$

但し、

$$\bar{a}^l \equiv \frac{1}{a(i,j,k)} \{ f'_{xx}(f'_x - f_x) + f'_{yx}(f'_y - f_y) \} \quad (21)$$

$$\bar{b}^l \equiv \frac{1}{a(i,j,k)} \{ f'_{xy}(f'_x - f_x) + f'_{yy}(f'_y - f_y) \} \quad (22)$$

と置換する。またエッジ点では $n_n(i,j,k)=2$ の場合が圧倒的に多いので $a(i,j,k)=1$ と見なして演算をする。

式(19)及び(20)によりオブティカルフローを算出することで、エッジ強度の一致の拘束条件を追加したボカシ処理を用いたグラディエント法を実現する。

3 実験

3.1 実験方法

今回提案したエッジ強度の一致性の拘束条件を、すでに提案しているボカシ処理を用いたグラディエント法に

追加した処理プログラムを作成し、今回の提案の有効性を検証した。

実験に使用した原画像の例を図3に示す。画素サイズは 128×128 でモノクロ256階調の図形で、コンピュータにより生成したものである。

実験では、従来のグラディエント法、前回提案のボカシ処理を用いたグラディエント法および今回提案したエッジ強度の一致性の拘束条件を追加したボカシ処理を用いたグラディエント法で、並進移動量が大きい物体のオプティカルフローを検出させ、検出精度の比較及び検討を行った。

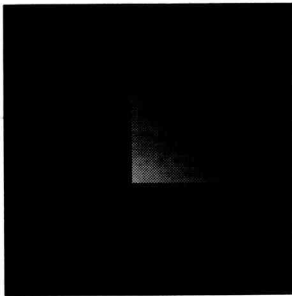


図3 実験に用いた原画像

3.2 並進移動に対する結果

図3の原画像が右方向8画素、上方向8画素の平行移動をした場合の検出されたオプティカルフローを図4に示す。図は移動前後のエッジ画像上に、移動前のエッジ点を出発点とする実線で検出されたオプティカルフローを表示している。

従来のグラディエント法で検出されたオプティカルフローは、正しい物体移動の位置づけがまったくなされていない(図4(a))。またボカシ処理を用いたグラディエント法で検出されたオプティカルフローでは、大まかに物体移動が読みとれはするものの、各画素での速度ベクトルの正しい位置づけはなされている部分はかなり少ない(図4(b))。それに対し、今回提案したエッジ強度の一致性の拘束条件を追加したボカシ処理を用いたグラディエント法では、各画素における速度ベクトルの正しい位置づけがなされている部分が従来のふたつの手法より増加している。また正しく検出されていない部分においても近似的な値が得られた(図4(c))。

この結果より、今回提案したエッジ強度の一致性の拘束条件が並進移動に対するオプティカルフロー検出の精度向上に有効であることが確認された。

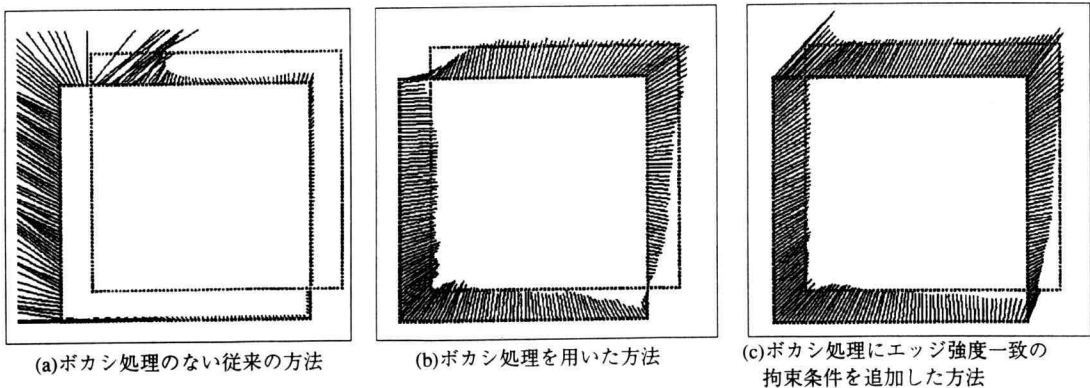


図4 実験結果1：並進移動物体に対するオプティカルフロー

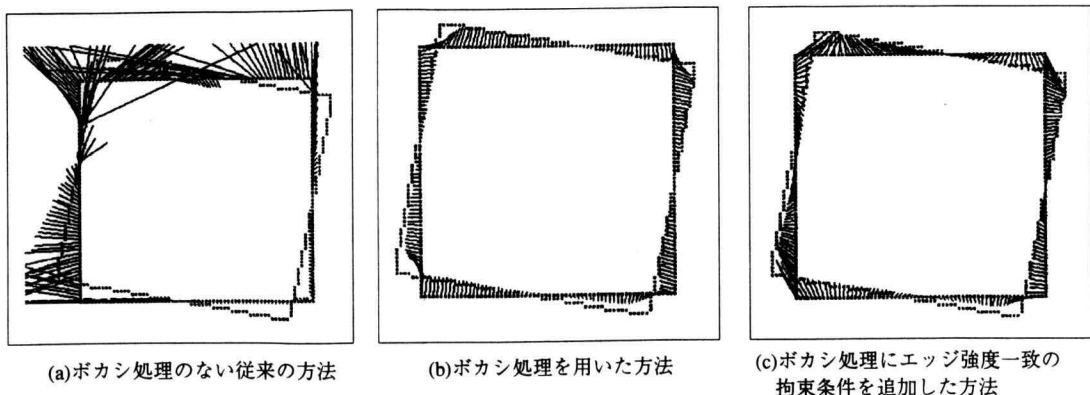


図5 実験結果2：回転移動物体に対するオプティカルフロー

3.3 回転移動に対する結果

図3の原画像で物体の中心のまわりに右回りに5度回転移動した場合の検出されたオプティカルフローを図5に示す。図の表示法は図4と同様である。

従来のグラディエント法で検出されたオプティカルフローは、平行移動物体のときと同様に、まったく正しい物体移動の位置づけがなされていない(図5(a))。またボカシ処理を用いたグラディエント法で検出されたオプティカルフローは、各画素での速度ベクトルの位置づけの正しい部分も存在するが、まったく正しい位置づけがなされていない画素も多数存在する(図5(b))。今回提案したエッジ強度の一致性の拘束条件を追加した処理の検出結果では、処理画像によって検出精度が向上する場合とそうでない場合が存在するという結果が得られた(図5(c))。

この結果より、今回提案したエッジ強度の一致性の拘束条件は、回転物体に対するオプティカルフロー検出精度を向上させる場合もあるが、同条件だけでは回転物体のオプティカルフロー検出は十分できないことがわかる。別の拘束条件が必要であると思われる。

4 まとめ

本研究では、エッジ強度の一致性の拘束条件をグラ

ディエント法に付加することで、オプティカルフローの検出精度を向上させる方法を提案した。

生成画像に基づくシミュレーション実験を、オプティカルフロー検出の運動依存として、並進運動する物体及び回転運動する物体の画像に対して行った。その結果、並進運動の場合には、ボカシ処理を用いたグラディエント法にエッジ強度の一致性の拘束条件を付加しフローを検出することにより、すべての場合でオプティカルフロー検出精度の向上が得られた。しかし回転移動物体では、処理動画像によりオプティカルフローの検出の精度向上が認められた場合と、そうでない場合が生じた。

今後の課題としては、

- ・回転運動に対するオプティカルフロー検出問題の解決
 - ・オプティカルフローの検出速度の向上
- 等がある。

参考文献

- 1)橋本, 百田, 野村: “4. オプティカルフローの検出”, 「パソコンにより動画処理」, 森北出版, 1993, p.133-178
- 2)山際, 井上, 関: “高速物体用オプティカルフロー検出法”, 神奈川工科大学研究報告 B, 第 20 号, p.139-148