

時間的相関を用いた動領域境界決定によるオプティカルフローの精度改善

Improvement of Optical Flow by Moving-Object Detection using Temporal Correlation

山本 孝之[†], 今村 幸祐^{††}, 正会員 橋本 秀雄^{††}

Takayuki Yamamoto[†], Kousuke Imamura^{††} and Hideo Hashimoto^{††}

あらまし 動画像から動き検出を行う手法の1つであるオプティカルフローは、動領域境界における検出精度が低いという問題点がある。そこで、動きの時間的な相関性を利用して動領域境界領域を抽出し、画像空間から特徴量を選択することでオプティカルフローの検出精度を改善する方法を提案し、有効性を検討する。

キーワード：オプティカルフロー、動領域境界、Uncovered・Occlusion 領域、動き補償予測

1. ま え が き

動画像処理の分野では、動領域に対する動き検出を正確に行うことが重要であり、特に動領域分割では、精度の高い動き検出アルゴリズムが必要である。動き検出手法として、オプティカルフローと呼ばれる画像輝度値の空間的変化と時間的変化を利用した輝度勾配法の研究が行われている^{1)~4)}。輝度勾配法によるオプティカルフローは、領域内部画素での検出精度は比較的高いが、動領域境界での検出精度が低いという問題がある。輝度勾配法は、画像全体に動き検出のモデルとして輝度値の保存性と動きの空間的な連続性を仮定している。そのため、モデルの当てはまらない画素または領域では、検出精度が低くなると考えられる。

動領域境界での検出精度向上に向けて、オプティカルフローの導出において仮定を満たさない画素を検出し、適応処理によりオプティカルフローの検出精度を改善する方法を既に提案した⁵⁾。しかし、提案した方法では動領域境界に面した2領域のうち、1領域は静止領域であると仮定した方法であり、種々の動きを含む画像に適用することは困難であった。

そこで、提案方法の拡張として、本論文ではオプティカルフローの時間的な相関性に注目し、これを利用した動領

域境界近傍領域の抽出、仮定を満たさない画素の判定を行う方法を提案する。そして、交差する2つの動領域の境界領域でのオプティカルフローを導出して、その有効性を検証する。

2. 画像空間の局所特徴量を用いた動領域境界における検出精度の改善方法

2.1 オプティカルフローの導出

画像の輝度値は、微小時間経過しても変化しないという輝度値の保存性を仮定することで、式(1)のオプティカルフローでよく知られた拘束条件式が導かれる。ただし、画像の輝度を $I(x, y, t)$ [x, y は空間座標, t は時間座標] とする。

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (1)$$

ここで、 I_x, I_y, I_t は、輝度の空間、時間方向の勾配であり、 (u, v) は動きベクトルとする。輝度値の保存性に加え、動き場が空間的に滑らかであるという動きの空間的な連続性を仮定し、それぞれの仮定に対する重み定数 α 付きの評価関数(2)を構成する。

$$\xi^2 = \int \int (\xi_b^2 + \alpha^2 \xi_c^2) dx dy \quad (2)$$

$$\xi_b^2 = (I_x u + I_y v + I_t)^2$$

$$\xi_c^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$$

評価関数の最小化を行うことで更新式(3) (4)が得られる。ここで、 \bar{u}, \bar{v} は動きの局所平均である²⁾。

$$u_{n+1} = \bar{u}_n - I_x \frac{I_x \bar{u}_n + I_y \bar{v}_n + I_t}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2} \quad (3)$$

2001年3月12日受付, 2001年5月24日再受付, 2001年6月1日採録

† 金沢大学 大学院 自然科学研究科

(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20, TEL 076-234-4894)

†† 金沢大学 工学部

(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20, TEL 076-234-4894)

† Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University

(2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-8667, Japan)

†† Faculty of Engineering, Kanazawa University

(2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-8667, Japan)

$$v_{n+1} = \bar{v}_n - I_y \frac{I_x \bar{u}_n + I_y \bar{v}_n + I_t}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2} \quad (4)$$

2.2 画像の局所特徴量を用いた検出精度改善方法

動領域境界における検出精度が低い問題点の要因は、オプティカルフローの導出の際の仮定を満たしていない領域であると考えられる。そこで、現フレームになると新たに発生する画素の集合である Uncovered 領域、次フレームになると隠蔽される画素の集合である Occlusion 領域は、輝度値の保存性を満たさない領域であり、また動領域境界は動きの空間的連続性を満たさない領域であることから、以下に示す検出精度改善を目指した方法を先に提案した⁵⁾。

・フレーム間差分による Uncovered, Occlusion 領域判定による適応的時間勾配算出

時間勾配には連続する3フレームを使用し、式(5)の近似式で算出していた。

$$\begin{aligned} I_t(t) &\approx \frac{1}{2} \{ [I(t+1) - I(t)] + [I(t) - I(t-1)] \} \\ &= \frac{1}{2} \{ I(t+1) - I(t-1) \} \end{aligned} \quad (5)$$

このとき、輝度値の保存性を満たさない領域の時間勾配には大きな誤差を含むと考え、Uncovered, Occlusion 領域に対しては式(6), (7)の近似式で算出することで誤差が低減されることを期待し、適応的に時間勾配を算出する方法を提案した。

$$\text{Uncovered画素 } I_t(t) \approx I(t+1) - I(t) \quad (6)$$

$$\text{Occlusion画素 } I_t(t) \approx I(t) - I(t-1) \quad (7)$$

動画像を背景領域と動領域に分けたとき背景領域は静止領域であると仮定し、連続する3フレームのフレーム差分絶対値として現フレームと次フレームとの差分絶対値を D_f 、現フレームと前フレームとの差分絶対値を D_b としたとき、以下の関係を用いて Uncovered, Occlusion 領域を判定していた。

$$D_f \text{ 小かつ } D_b \text{ 大} \implies \text{Uncovered画素}$$

$$D_f \text{ 大かつ } D_b \text{ 小} \implies \text{Occlusion画素}$$

・適応窓関数による局所平均処理

従来は、画像均一に注目画素を中心とする 3×3 画素から局所平均算出をしていた。しかし、図1(a)に示すように従来算出位置では、例外値と呼ばれる他領域画素を含むことになる。そこで、動領域境界では例外値を含まない図1(b)のような位置で算出することで検出精度の改善が期待できる。予め動領域境界情報は存在しないので、動領域境界画素はエッジ画素であると考え、エッジを跨がない方向から局所平均算出を行うのが、適応窓関数による局所平均処理である。このときエッジの有無は、オプティカルフロー導出のために既に算出してある空間勾配を用いて判定する。

3. 時間的相関を用いた動領域境界における改善

前節で述べた適応窓関数による局所平均処理は、種々の動きを含む動画像に適用可能な処理であるのに対して、

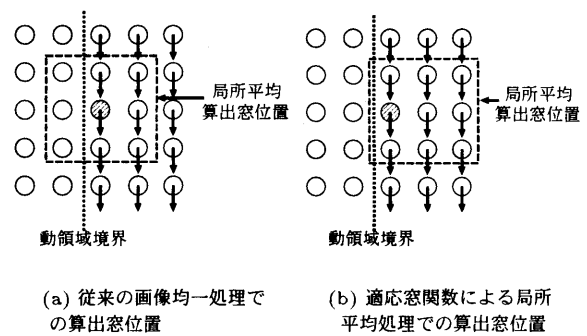


図1 動領域境界における局所平均算出
Calculation of local average on moving-object boundaries.

Uncovered, Occlusion 領域判定による適応的時間勾配算出には適用可能な画像に制約がある。つまり、2つの動領域が交差する境界には適用不可能であった。これは、フレーム間差分による判定に一方の領域が静止領域であることを利用しているためである。2つの動領域が交差する場合には、一方の動領域を静止領域とする処理を Uncovered, Occlusion 領域の存在する領域境界画素もしくはその近傍領域に適用することで、フレーム間差分による判定方法を拡張できる。

3.1 動領域境界領域の抽出

Horn & Schunck の方法²⁾(以下従来法と呼ぶ)と同様に3フレーム使用して空間・時間勾配の算出を行う際に、式(8)に示す輝度値の保存性の拘束条件式を評価値として用いる。このとき、オプティカルフローには時間的な相関性が動画像に存在していると考え、前フレームでのオプティカルフロー (u, v) を用いる。

$$\phi = |I_x u + I_y v + I_t| \quad (8)$$

時間勾配に含まれる誤差が大きい Uncovered, Occlusion 画素では、式(8)の評価値が大きくなることを期待できる。そこで評価値 ϕ と閾値 T_1 を比較し、閾値以上であれば動領域境界候補画素とする。しかし、理想的な場合には時間勾配に含まれる誤差がそのまま評価値に反映されるが、実画像データでは前フレームでのオプティカルフロー検出に含まれる誤差、およびこれとは独立に生じる現フレームの時間勾配に含まれる誤差で相殺されることなどにより、Uncovered, Occlusion 候補画素の誤検出や検出見逃しにより候補画素として判定されない画素が生じる。精度の良いオプティカルフローを得るためには、Uncovered, Occlusion 候補画素をできるだけもらさず検出し、その後の Uncovered, Occlusion 画素判定処理で絞り込むことが必要となる。そこで、評価値による判定では閾値未満であった画素の周辺 3×3 画素領域中に候補画素が3画素以上存在すれば、注目画素も候補画素とする拡張処理を行う。

3.2 動き補償予測を利用した Uncovered, Occlusion 画素判定

候補画素から Uncovered, Occlusion 画素の判定を行う。

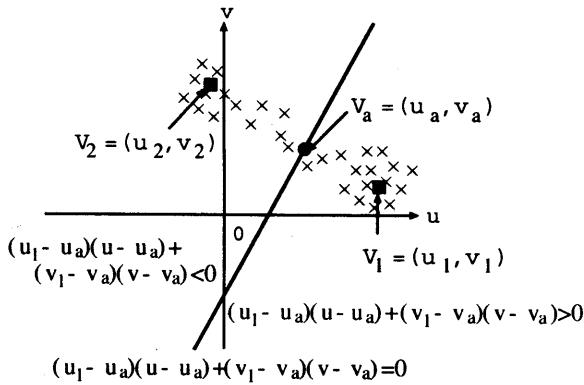


図 2 近傍領域から動領域の移動量の抽出
Detection of moving-object motion from local regions.

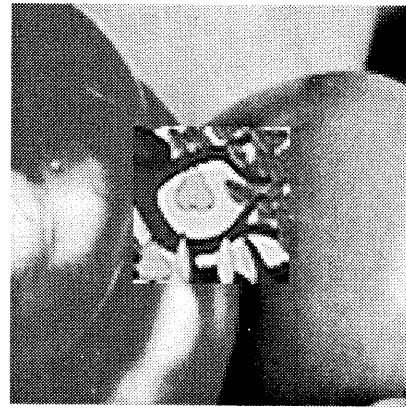


図 3 合成画像
Synthetic image.

動領域同士の境界において一方の領域を静止領域と見なし
て扱う方法として、画像符号化で用いられている動き補償
予測を用いる。動き補償を用いると前節のフレーム間差分
を予測誤差に置き換えて扱うことが可能になる。以下に、
動き補償予測誤差を利用した Uncovered, Occlusion 画素
判定方法について述べる。

・候補画素は動領域境界に集中して検出されることが期
待できるため、近傍領域内には異なる動領域の動きが含ま
れている。そこで、近傍領域 $(2 \times size + 1) \times (2 \times size + 1)$
から動領域の動きを抽出する。2次元のヒストグラムを作
成し、頻度の一番高い v_1 と期待値 v_a を算出する。次に、
期待値 v_a を通り $(v_1 - v_a)$ を法線ベクトルする直線を想
定したとき、ヒストグラムは直線に対して正・負の2領域
に分割される。 v_1 は正の領域に必ず存在するので、負の
領域内で頻度が一番高い v_2 を抽出する(図2)。

・ヒストグラムから抽出した動領域の移動量のうち、 v_1
が注目画素の現フレームでの正確な移動量であると考え、
 v_1 を用いて前・次フレームから動き補償予測を行う。また、
 v_2 は異領域の移動量であり、前・次フレームから v_2 で予
測した輝度値は注目画素の予測ではなく、前フレームから
の予測輝度値は注目画素から相対的に $(v_1 - v_2)$ 、次フ
レームからの予測輝度値は同様に $(v_2 - v_1)$ に位置する
輝度値の予測を行っている。予測誤差絶対値を式(9)～
式(12)で示す $D_{f1}, D_{b1}, D'_{f1}, D'_{b1}$ として算出する。

$$D_{f1} = |I(x + u_1, y + v_1, t + 1) - I(x, y, t)| \quad (9)$$

$$D_{b1} = |I(x, y, t) - I(x - u_1, y - v_1, t - 1)| \quad (10)$$

$$D'_{f1} = |I(x + u_2, y + v_2, t + 1) - I(x - u_1 + u_2, y - v_1 + v_2, t)| \quad (11)$$

$$D'_{b1} = |I(x + u_1 - u_2, y + v_1 - v_2, t) - I(x - u_2, y - v_2, t - 1)| \quad (12)$$

・ v_2 が注目画素における正確な移動量である場合も想定
して、上記と同様な手順で、予測誤差絶対値を $D_{f2}, D_{b2},$
 D'_{f2}, D'_{b2} として算出する。

・背景領域が静止領域である場合の Uncovered, Oc-

clusion 領域の関係が、注目画素に対して正確な移動量
を用いた場合の動き補償予測誤差 D_f, D_b においても成立す
る。また、注目画素の属さない異領域の移動量を用いて予
測した輝度値が、前・次フレームにおいては Uncovered,
Occlusion 領域に属する画素であり、現フレームに対応す
る輝度値が存在しない。つまり、フレーム間差分(動き補
償予測誤差)の大小関係は逆の関係が成立することにな
るが、異領域の移動量を用いた場合の動き補償予測誤差
 D'_f, D'_b にも大きな差が生じることが期待できる。そこで、
 $|D_{f1} - D_{b1}| + |D'_{f1} - D'_{b1}|$ と $|D_{f2} - D_{b2}| + |D'_{f2} - D'_{b2}|$
を比較し、大きい方の v_1 と v_2 の組合せが注目画素にとつ
て最良な動きの組合せであると判断し、以下の手順を行
う。

○ $|D_{f1} - D_{b1}| + |D'_{f1} - D'_{b1}|$ の方が大きい場合
 $d_f = D_{f1}, d_b = D_{b1}, d'_f = D'_{f1}, d'_b = D'_{b1}$

○ $|D_{f2} - D_{b2}| + |D'_{f2} - D'_{b2}|$ の方が大きい場合
 $d_f = D_{f2}, d_b = D_{b2}, d'_f = D'_{f2}, d'_b = D'_{b2}$

・背景領域が静止領域である場合の関係を拡張すること
で、以下の関係が成立する画素が Uncovered, Occlusion
画素である。

○ Occlusion 画素条件
 $\begin{pmatrix} d_f & \text{大} & \text{かつ} & d'_f & \text{小} \\ d_b & \text{小} & & d'_b & \text{大} \end{pmatrix}$

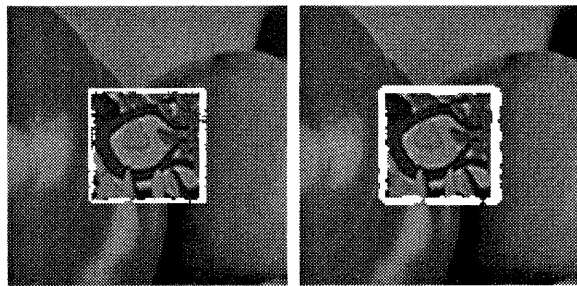
○ Uncovered 画素条件
 $\begin{pmatrix} d_f & \text{小} & \text{かつ} & d'_f & \text{大} \\ d_b & \text{大} & & d'_b & \text{小} \end{pmatrix}$

上記の関係を調べるために以下のような閾値 T_2 と T_3 と比
較し、条件を満たす画素を Uncovered, Occlusion 画素と
して判定する。

○ Uncovered, Occlusion 画素条件
 $|d_f - d_b| \geq T_2$ かつ $|d'_f - d'_b| \geq T_2$

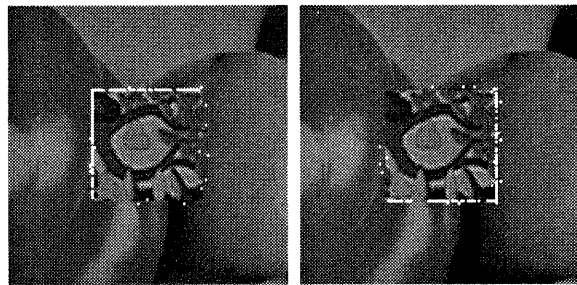
○ Occlusion 画素条件
 $d_b \leq T_3$ かつ $d'_f \leq T_3$

○ Uncovered 画素条件
 $d_f \leq T_3$ かつ $d'_b \leq T_3$



(a) 拡張前の候補画素

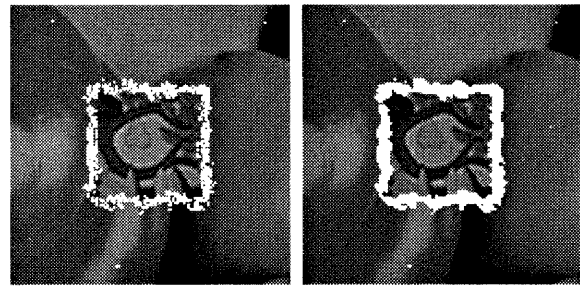
(b) 拡張後の候補画素



(c) Uncovered 画素

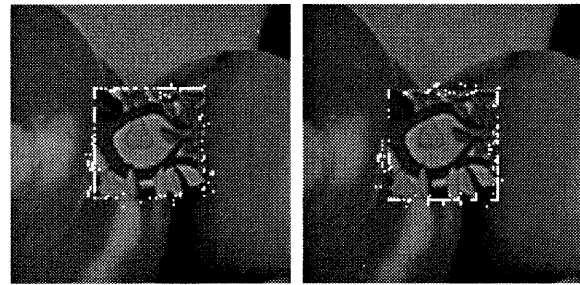
(d) Occlusion 画素

図4 前フレームとして正確なオプティカルフローを用いた場合での Uncovered, Occlusion 判定画素 (白点表示)
Detected uncovered or occlusion pixels using correct optical flow in previous frame.



(a) 拡張前の候補画素

(b) 拡張後の候補画素



(c) Uncovered 画素

(d) Occlusion 画素

図5 前フレームとして従来法により導出したオプティカルフローを用いた場合での Uncovered, Occlusion 画素 (白点表示)
Detected uncovered or occlusion pixels using conventional optical flow in previous frame.

4. 計算機シミュレーション

提案法の有効性を確認するために図3のような 128×128 pixel の合成画像を作成した. 中心にある 50×50 pixel の動領域が水平右方向に 1 pixel/frame 移動し, それ以外の背景領域が垂直上方向に 1 pixel/frame 移動する画像である.

オプティカルフローの評価手法として, 正確なオプティカルフローを $v_c = (u_c, v_c)$, 検出されたオプティカルフローを $v_e = (u_e, v_e)$ としたとき, 式(13)で表される平均自乗誤差 MSE (Mean Square Error) と自乗誤差の標準偏差で検出精度の比較を行う. ただし, N は画素数である.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y (v_c - v_e)^2 \quad (13)$$

前フレームとして, 正確なオプティカルフローを用いたときの Uncovered, Occlusion 判定結果を図4, 従来法により導出したオプティカルフローを用いたときの判定結果を図5に示す. ただし, 判定閾値は経験的に $T_1=1.0$, $T_2=10.0$, $size=5$ とし, T_3 については図4で $T_3=1.0$, 図5は $T_3=10.0$ とした. 図4と図5より, 輝度値の保存性を意味する拘束条件式を評価値とすることで動領域境界付近に候補画素が多数存在し, 拡張処理を行うことで候補画素に含まれていない Uncovered, Occlusion 画素を候補画素とすることができた. 次に, 候補画素から Uncovered, Occlusion 画素判定を行うと, 前フレームに正確なオプティカルフローを用いた場合には良好な判定結果である

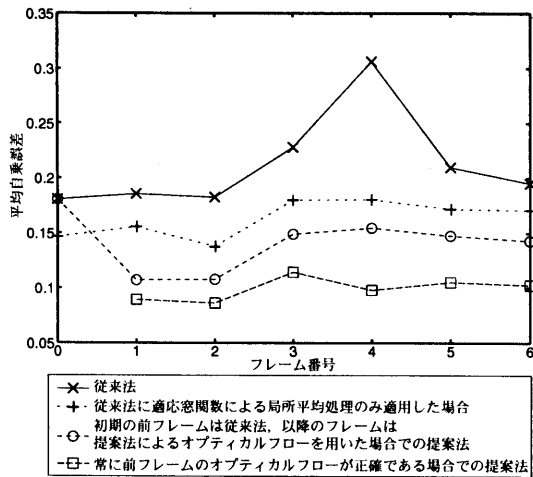
のに対して, 従来法により導出したオプティカルフローを用いた場合には, 誤検出画素の増加が認められるが, Uncovered, Occlusion 画素の判定が行われていると言える. 特に, 動き補償予測誤差が大きく発生する急峻な輝度値の変化が認められる動領域境界における判定結果は, 正確なオプティカルフローを用いた場合と比較しても同程度の判定結果が得られており, 比較的良好な結果であると言える.

動領域境界付近におけるオプティカルフローの検出精度を図6に示す. 図6より, 平均自乗誤差・標準偏差ともに従来法に比べ適応窓関数を適用することで改善効果が認められる. さらに, 時間的相関を用いた Uncovered, Occlusion 判定による適応的時間勾配算出を行うことで改善効果が認められ, 連続するフレームにおいて安定した改善効果が得られている.

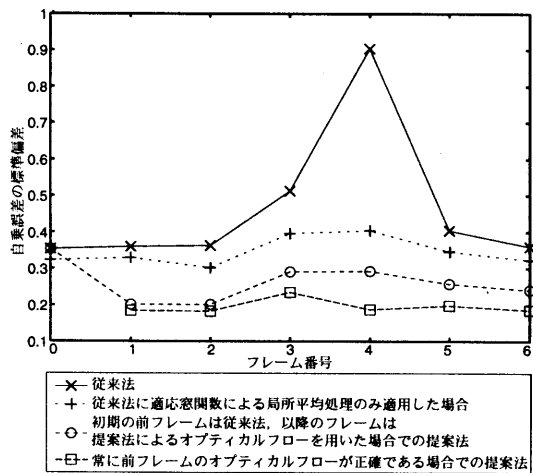
フレーム番号1でのオプティカルフローを1画素間隔で表示したものを図7に示す. 図7より, Uncovered, Occlusion 画素として判定された画素における改善が見られる. 特に, 水平方向に移動する動領域左端の Uncovered 領域での改善効果が大きい. しかし, 移動方向の改善効果が見られるが移動量として十分な改善効果が得られず, まだ検出誤差を含んでいる画素の存在が動領域下端の Occlusion 画素等で見られる.

5. むすび

本論文では, オプティカルフローの動領域境界における

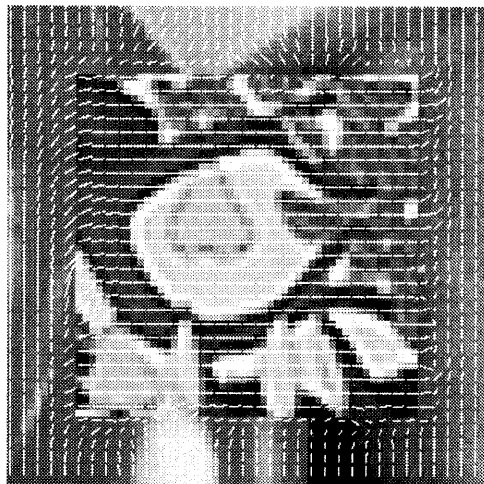


(a) 平均自乗誤差

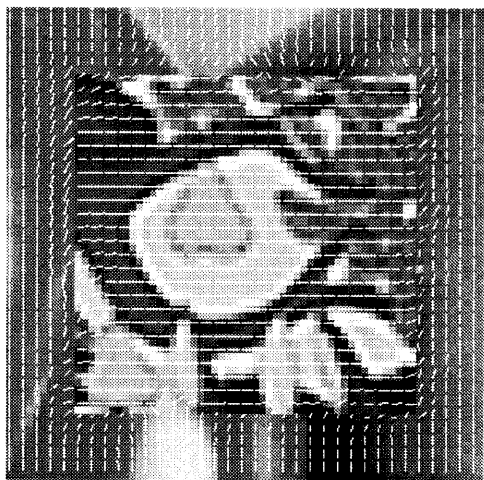


(b) 標準偏差

図 6 オプティカルフローの検出精度
Accuracy of optical flow.



(a) 従来法



(b) 提案法

図 7 オプティカルフロー
Optical flow.

不正確性の要因として、導出の際の仮定である輝度値の保存性を満たさない Uncovered, Occlusion 領域を挙げ、その改善を行うためフレーム間差分に代わる動き補償予測誤差による判定方法を提案した。提案法では、判定画素に誤検出画素の存在が認められたが、従来法と比較して安定したオプティカルフローの改善効果が見られ、その有効性を確認することができた。今後の課題として、実画像への適用、閾値の設定法などが挙げられる。

【文 献】

- 1) 吹抜敬彦：“画像信号による移動量、速度の測定”，信学技報，IE78-67, pp.35-41(1978)
- 2) B.K.P. Horn, B.G. Schunck：“Determining optical flow”，Artif. Intell., 17, pp.185-204(1981)
- 3) J.L. Barron, D.L. Fleet, S.S. Beauchemin：“Performance of Optical Flow Techniques”，Int. J. Computer Vision, 12, 1, pp.43-77(1994)
- 4) 金子 豊，鹿嶋善明，金次保明，田中 豊：“画像の局所特徴を考慮した固有値勾配法による動き推定の精度改善”，信学技報，IE99-113(1999)
- 5) 山本孝之，今村幸祐，橋本秀雄：“局所特徴量を用いたオプティカルフロー推定精度の改善”，情処学AVM研資，2000，89, pp.61-66(Sep. 2000)



やまもと たかゆき
山本 孝之 1998年，金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。2001年，同大大学院自然科学研究科博士前期課程修了。同年，ソニー(株)入社。



いまむら こうすけ
今村 幸祐 1995年，長崎大学工学部電気情報工学科卒業。1997年，同大大学院工学研究科修了。2000年，同大大学院海洋生産科学研究科修了。同年より，金沢大学工学部情報システム工学科助手。画像信号の高効率符号化などの研究に従事。工博。



はしもと ひでお
橋本 秀雄 1968年，大阪大学工学部卒業。1970年，同大大学院修士課程修了。1975年，同大大学院博士課程修了。同年，電電公社(現NTT)電気通信研究所入所。以来，画像符号化方式，画像通信方式の研究開発に従事。現在，金沢大学工学部情報システム工学科教授。工博。