

## 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

山本 孝之 今村 幸祐 橋本 秀雄

金沢大学工学部情報システム工学科

〒 920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20

Tel. 076-234-4894 Fax. 076-234-4900

E-mail takayama@gin.ec.t.kanazawa-u.ac.jp

### 概要

動画の領域分割では、精度の高い動きベクトルを検出する必要がある。特にオブジェクト境界部分での精度が、動領域分割結果の良否を左右する。オプティカルフローは、動画での輝度値変化を一種の流体と見立てて、その速度場を動きベクトルとして検出する方法である。しかし、オプティカルフローには動きの境界部分での検出精度が低いという問題がある。本報告では、動きの境界精度改善のために、画像の局所的な特徴である時間勾配を用いた Uncovered, Occlusion 領域判定による時間勾配の再算出を行う方法と、動きの局所平均算出にシフト関数を導入して適応処理を行う方法を提案する。合成画像を用いた実験結果から、提案方法が動きの境界部分でのオプティカルフロー推定に有効であることを報告する。

## Improvement of Optical Flow using Local Characteristics

Takayuki YAMAMOTO Kousuke IMAMURA Hideo HASHIMOTO

Faculty of Engineering, Kanazawa University

2-40-20 Kodatsuno Kanazawa, 920-8667 Japan

Tel. 076-234-4894 Fax. 076-234-4900

E-mail takayama@gin.ec.t.kanazawa-u.ac.jp

### Abstract

High accurate motion vector detection is needed for video segmentation into meaningful regions. Especially, segmentation result at moving object boundaries is influenced through the accuracy of motion vectors at those areas. Optical flow is a motion vector detection method in motion field, like so fluid model. But optical flow is not high accurate on motion boundaries. In this paper, two methods for improving this problem are proposed. One method is to decide Uncovered or Occlusion pixels using temporal gradient information, and to reestimate temporal gradient at those regions. The other is to decide motion boundaries using spatio-gradient information, and to apply an adaptive shifted template for estimation optical flow in such regions. Experimental results for a synthetic image show that proposed methods can improve the estimation accuracy on motion boundaries.

### 1 はじめに

動画処理の分野では、動画の動き推定を正確に行うことが重要であり、特に動領域分割では、精度の高い動き推定アルゴリズムが必要である。

近年、動き推定として、従来画像符号化に用いられてきた画像ブロック毎に動き推定を行うブロックマッチング法以外に、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][2][3][4]。輝度勾配法は、ブロックマッチング法と比べ推定値に精度の制限が無いことが利点であるが、動きの境界部分での検出精度が低いという問題がある。輝度勾配法は、画像全体に動き推定のモデルとして輝度保存性と動きの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、動き推定精度が低くなると考えられる。

本報告では、動きの境界精度向上のために、輝度保存性を満たさない画素と動きの連続性を満たさない画素に対して、空間・時間的な変化を意味する勾配を利用して判定を行うアルゴリズムを検討する。その後、輝度保存性の成立しない画素では時間勾配の再算出を行う。また、動きの連続性の成立しない画素では動き推定の際に空間勾配を利用したシフト関数を導入し、適応処理を行うことで動きの境界部分での検出精度の改善を行う方法を提案し、その有効性を検討する。

## 2 オプティカルフローの導出法と問題点

### 2.1 オプティカルフローの導出

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。画像の輝度値は、微小時間経過しても変化しないと仮定すると式 (1) の関係式を導くことが出来る。

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

式 (1) をテーラー展開し、2 次の項以降を無視するとオプティカルフローでよく知られた拘束条件式 (2) が導かれる [1][5]。

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (2)$$

式 (2) 以外にも輝度値の保存を意味する拘束条件式が提案されているが [6]、ここでは一般的な拘束条件式 (2) を用いる。

$I_x, I_y, I_t$  は、輝度の空間、時間的な勾配であり、 $(u, v)$  は動きベクトルである。式 (2) のみでは  $(u, v)$  を得ることができないため、輝度値に対する条件に加え、動き場が空間的に滑らかであると仮定し、評価関数 (3) を構成する。

$$\begin{aligned} \xi^2 &= \iint (\alpha^2 \xi_c^2 + \xi_b^2) dx dy \quad (3) \\ \xi_b^2 &= (I_x u + I_y v + I_t)^2 \\ \xi_c^2 &= \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \end{aligned}$$

このとき、 $\alpha$  は、2 つのオプティカルフローに対する仮定に対する重み定数であり、画像特性や動きの特性に合わせて適切に決めるパラメータである。

評価関数の最小化問題を解くことでオプティカルフローの推定を行う更新式 (4) を得ることが出来る [1]。ここで、 $\bar{u}, \bar{v}$  は動きの局所平均である。

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

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

[2][3] で提案されている方法は、輝度値の変化が無い画素ではオプティカルフローの検出が行えないのに対して、更新式 (4) は画像中の全画素でオプティカルフローの検出が行える特徴を持っている。

### 2.2 問題点

更新式からの動き推定は、画像全体が様な動きをしている場合には比較的高い精度の結果をもたらす。しかし、様な動きをしていない場合、具体的には複数の動きが画像平面内に存在するような画像においては、動きの境界部分における推定精度は低い。その原因として、以下の 2 つのことが考えられる。

#### 2.2.1 Uncovered, Occlusion 領域の存在

現フレームから次フレームへの動き推定を行う場合、輝度値の保存性を満たさない画素が動きの境界部分で存在する。つまり、次フレームではオブジェクトの移動により隠れる画素の集合である Occlusion 領域が存在する。逆に現フレームから前フレームへの動き推定を行う場合も同様に、現フレームになるとオブジェクトの移動により新しく現れる画素の集合である Uncovered 領域が存在する。Uncovered, Occlusion 領域の発生しない条件は、動きが  $1\text{pixel}/\text{frame}$  以下のときであるが、多くの動画画像はこの条件を満たしていないので、Uncovered, Occlusion 領域での推定精度は低くなる。

#### 2.2.2 動きの境界画素での局所平均算出

従来は、図 1 に示すような重みを持つテンプレートを用いて繰り返しの度に動きの局所平均を算出し、更新式により徐々に動き更新しながら収束するまで繰り返す処理を行っている。しかし、この重みでは、動きの境界部分では収束が遅くなり、動きの境界部分の輝度値が比較的一様な画像では動きの洩れだまたは動きの境界が潰されて滑らかな推定結果になると考えられる。

空間勾配の大きさを利用した重みで、動きの局所平均算出を行う方法 [2] が提案されているが、推定結果としてはまだ不十分である。繰り返し途中で注目画素の動きに対する例外値 (異なる動き) を判定する方法 [6] を用いれば、動きの境界付近での精度改善は見込める。しかし、例外値を判定する際にすでに境界が潰

されている場合も想定され、画像種別や収束性を考慮する必要がある。

$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{12}$
$\frac{1}{6}$	0	$\frac{1}{6}$
$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{12}$

図 1: 局所平均算出に用いる重み

以下では、これら問題点を解決するための方法を提案し、合成画像を用いてその有効性を検討する。

### 3 動きの境界近傍での推定精度の改善

前節で述べた問題点を改善する方法を提案する。問題の前提として、画像を動領域と背景領域に分けたとき、背景領域の動きは静止であるとする。さらに、空間・時間勾配は、[7]で提案されているタップ数3の3次元フィルタで算出する。例えば、時間勾配の算出には3フレームを使用し、式(5)を注目画素と周囲画素8画素で算出し、その平均を注目画素の時間勾配とするフィルタである。

$$f'(t) = \frac{1}{2} (f(t+1) - f(t-1)) \quad (5)$$

このフィルタを用いることで[2]で述べられている入力画像へのLPF(Low Pass Filter)処理が無くても同等の推定結果を得ることができる。

#### 3.1 Uncovered, Occlusion 判定による適応的時間勾配算出

3フレーム使用して、空間・時間勾配の近似を行うとき輝度値の保存性を満たさない画素の影響が出るのは時間勾配である。特に、Uncovered, Occlusion 領域では、式(5)の時間勾配算出では不正確な近似値しか得られない。そこで、Uncovered, Occlusion 領域の判定法として、以下の手順を全画素に行い、判定された画素では適切な2フレームのみを使用して時間勾配の再算出を行う。

・現フレーム  $t$  と次フレーム  $t+1$ 、現フレーム  $t$  と前フレーム  $t-1$  とのフレーム差分の絶対値  $D_f$  と  $D_b$  を算出する。

$$D_f = |I(x, y, t+1) - I(x, y, t)|$$

$$D_b = |I(x, y, t) - I(x, y, t-1)|$$

Uncovered, Occlusion 領域では、 $D_f$  または  $D_b$  の一方が大きな値になり、他方が0に近い値になることが期待される。

・  $D_f$  と  $D_b$  の差分の絶対値と閾値  $T_1$  と比較する。

$$|D_f - D_b| \geq T_1$$

差分の大きさが閾値以上の画素は、Uncovered, Occlusion 候補とする。閾値以上の画素で、 $D_f$  の方が  $D_b$  の比べ大きく  $D_b$  が閾値  $T_2$  以下のときは Occlusion 候補画素、その逆は Uncovered 候補画素とする。

・上の手順では、動領域内の画素も多数選択されるので、更に多くの情報を用いて Uncovered, Occlusion 候補を絞りこむ。注目画素の輝度値の情報だけでなく、近傍1画素つまり周囲8画素と注目画素の  $D_f$  (Uncovered 候補) または  $D_b$  (Occlusion 候補) の平均値  $A$  を算出し、閾値  $T_3$  と比較する。

$$A \leq T_3$$

この条件を満たす画素を、Uncovered, Occlusion 画素として時間勾配  $I'_t$  の再算出を行う。再算出には、2フレームを使用し、Uncovered 画素では現フレームと次フレーム、Occlusion 画素では現フレームと前フレームから算出する。

・再算出した  $I'_t$  と閾値  $T_4$  を比較する。

$$|I'_t| \leq T_4$$

条件式を満たさない画素は、Uncovered, Occlusion 画素ではないと判断して前に算出した  $I_t$  をオプティカルフロー推定に用いる。条件式を満たす画素では Uncovered, Occlusion 画素と判断して再算出した  $I'_t$  をオプティカルフロー推定に用いる。

#### 3.2 シフト関数による適応処理

画像全体に図1で示した重みのテンプレートで局所平均の算出を行ってきたが、局所平均算出に用いる画素を動きに対する仮定である滑らかさが成り立つ画素に限定することで動きの境界部分の精度改善を目指す。

動きの境界部分には、エッジが存在していると考えられるのでエッジを跨がない方向の9画素から局所平均の算出を行うことで、動きの境界部分での精度の改善が期待できる。

輝度勾配法では、空間勾配が求められているのでエッジ判定に空間勾配を用いることができる。しかし、空間勾配だけではエッジの存在する方向は分からないため、以下の手順でエッジの存在する方向を判定する。

・空間勾配の大きい方向の大きさと閾値  $T_5$  を比較する。閾値以上ならばエッジが存在すると判定してテンプレートを1画素シフトさせる。

○水平方向の勾配  $I_x$  の方が垂直方向の勾配  $I_y$  より大きい場合

$$\begin{aligned} LEFT &= |I(x, y, t) - I(x-1, y, t)| \\ RIGHT &= |I(x, y, t) - I(x+1, y, t)| \end{aligned}$$

$LEFT \geq RIGHT$  ならば右に1画素シフトした  $3 \times 3$  画素, 逆の場合には左に1画素シフトした  $3 \times 3$  画素を用いる.

○垂直方向の勾配  $I_y$  の方が水平方向の勾配  $I_x$  より大きい場合

$$\begin{aligned} UP &= |I(x, y, t) - I(x, y+1, t)| \\ DOWN &= |I(x, y, t) - I(x, y-1, t)| \end{aligned}$$

$UP \geq DOWN$  ならば下に1画素シフトした  $3 \times 3$  画素, 逆の場合には上に1画素シフトした  $3 \times 3$  画素を用いる.

シフト方向を繰り返し処理開始前に決定して, 以後は決まった方向で局部平均を算出して更新式によりオプティカルフローを検出して行く.

この際の問題点として, 一度決まったシフト方向を以降も同様に採用すると, シフトの必要が無いオブジェクト内にもシフト対象となる画素が存在する. このような画素を除くために繰り返し途中でのシフト方向の再チェックを行う.

#### シフト方向再チェック方法

予め決めておいた繰り返し回数で, シフト方向の再チェックを行う. シフトした方向と逆の1画素(動きの境界部分では注目画素の動きとは異なる動き推定される画素)とのオプティカルフローの差分自乗  $D$  と閾値  $T_6$  を比較する.

$$D \leq T_6$$

上の条件式を満たすとき, その画素は動きの境界画素ではないと判定して次のイタレーションからシフトしない  $3 \times 3$  画素で局部平均算出を行う. 条件式を満たさない画素は, 動きの境界画素と判定して継続してシフトした  $3 \times 3$  画素を用いて更新を行う.

## 4 計算機シミュレーション結果

提案方法の有効性を確認するために図2のような  $150 \times 150$ pixel の合成画像を作成した. 中心にある  $50 \times 50$ pixel のオブジェクトが,  $1\text{pixel}/\text{frame}$  で水平方向に動いている画像である. 背景領域は, 静止領域である.

オプティカルフローの評価方法として, 正確な動きを  $\mathbf{v}_c = (u_c, v_c, 1)$ , 推定された動きを  $\mathbf{v}_e = (u_e, v_e, 1)$  としたとき, 式(6)(7)の平均自乗誤差 MSE (Mean

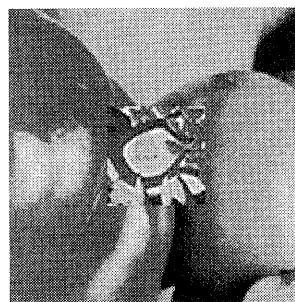


図2: テスト画像

Square Error), 平均角度誤差 MAE (Mean Angle Error) とそれぞれの標準偏差で推定精度の比較を行うことができる [2][8]. ただし,  $N$  は画素数である.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y (\mathbf{v}_c - \mathbf{v}_e)^2 \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y \left( \arccos \frac{\mathbf{v}_c \cdot \mathbf{v}_e}{\|\mathbf{v}_c\| \|\mathbf{v}_e\|} \right) \quad (7)$$

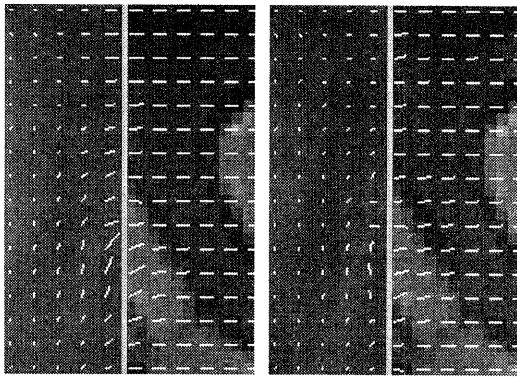
### 4.1 Uncovered, Occlusion 判定による時間勾配再算出に伴う改善

従来法, Uncovered, Occlusion 判定による時間勾配再算出を行った勾配を用いたオプティカルフローの検出結果を図3に示す. ただし, 閾値は  $T_1$  を 5.0,  $T_2$  を 1.0,  $T_3$  を 5.0,  $T_4$  を 1.0 とした. 図3は, 動きの境界を白い縦線で表示し, 推定結果を1画素間隔で表示したものである.

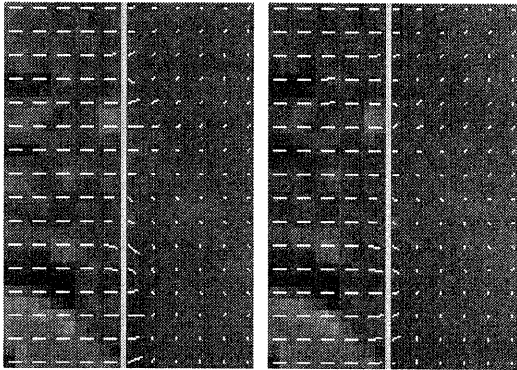
Uncovered, Occlusion 領域ともに改善が見られる. これより, 動きの境界部分での不正確性の原因の1つが時間勾配の算出法にあることが確かめられた. Uncovered, Occlusion 領域で正確に判定され, 時間勾配の再算出が行われた割合は, Uncovered 領域で 100%, Occlusion 領域で 86% であった. この結果は, 閾値の設定や画像の絵柄等により判定の容易な領域や困難な領域が存在していることを示している.

### 4.2 シフト関数による適応処理

図3の結果は, 動きの境界と判断できるような十分な結果ではないと考えられる. さらに, 動きの境界は Uncovered, Occlusion 領域だけではなく, 図2のオブジェクト上側のように動きの境界が, 移動しない場合も存在する. そのような境界においても検出精度改善の行われる方法が必要になる. そこで, シフト関数による適応処理を行う. シフト関数により, 1画素シフトすることになった画素を図4に示す.



(a) 従来法 (Uncovered 領域)(b)Uncovered 領域での改善



(c) 従来法 (Occlusion 領域)(d)Occlusion 領域での改善

図 3: Uncovered, Occlusion 判定による改善

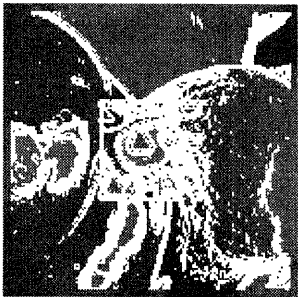
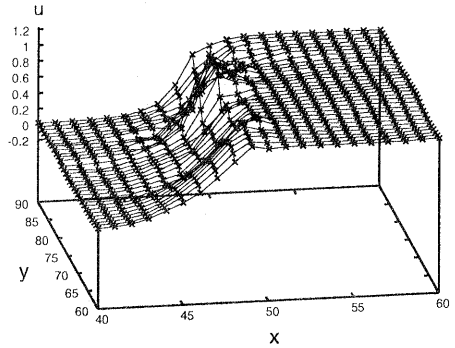


図 4: シフトが適用される画素 (白点表示)

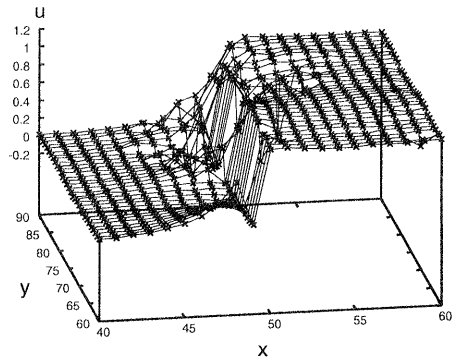
動きの境界であり画像のエッジに対応している画素では、シフトする画素として判定されている。しかし、動オブジェクトの右端のような比較的絵柄のはっきりしている領域ではうまく判定されていない。さらに、背景やオブジェクト領域内にシフトが適用される画素が存在する。そのような画素は、オプティカルフローの推定に不必要なので取り除く必要がある。

シフト関数による適応処理結果を図 5 に示す。ただし、閾値  $T_5$  は 5.0 とし、図 5 は Uncovered 領域にお

けるオプティカルフローの水平方向成分を 3 次元表示したものである。垂直方向成分は、適応処理を施す前と後ではほとんど変化が見られなかった。



(a) 従来法



(b) シフト関数導入

図 5: シフト関数による改善

図 5 より従来法の境界部分では、滑らかな変化となり、動きの境界付近の 3 ~ 5 画素でその影響がみられる。それに対してシフト関数による適応処理を従来法に加えることで滑らかな変化をしている境界部分が減少し、急峻な変化を示す部分が増加している。つまり、動きの境界部分での不正確性の原因の 1 つとして考えたオプティカルフロー算出の際の局部平均算出を動きに合わせて適切に切替えることで動き推定精度の改善が行われることを確認できる。

オブジェクト内において、シフト関数による適応処理により従来法に比べ動き推定精度が低下している画素が見られる。そこで、シフト方向の再チェックを繰り返し途中で行き、不適切な画素を減少させることにする。50 回繰り返し処理が終了した時点でシフト方向の再チェックを行った。この際に用いた閾値  $T_6$  は、0.1 とした。条件を満たし、50 回目以降の繰り返しでもシフトして局部平均算出を行う画素を図 6 に示す。

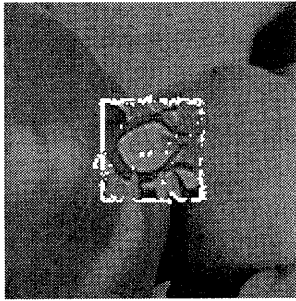


図 6: シフト再チェック後にシフトの適用される画素 (白点表示)

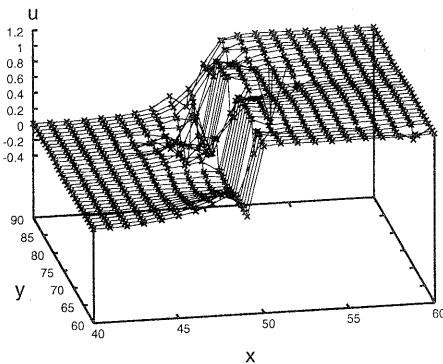


図 7: シフト方向再チェックを行った場合

図 6 より, オブジェクト内や背景領域内の本来はシフトしないでも動きの滑らかさを満たすような画素を省くことができています。しかし, 動きの境界画素全てが残っているのではない。これは, 繰り返し前に決めたシフト方向が適切な方向ではない画素や境界部分にエッジと判定できるような輝度値の変化が見られない画素が存在しているためである。シフト方向再チェックを行った場合のオプティカルフローを図 7 に示す。図 5 のシフト関数導入による結果と同等の結果である。しかし, 動きの境界にも関わらずシフトしない画素では改善効果は見られなかった。

以上のことを客観的評価において比較を行う。オブジェクトとその周囲 10 画素つまり,  $70 \times 70$  画素での提案方法の改善効果を表 1 に示す。表 1 より, 時間勾配の再算出を行うことで改善が行われていることが分かる。特に, Uncovered, Occlusion 領域で改善効果が大きい。次にシフト関数を導入した適応処理を組み込んだだけでは改善の効果が見られない, しかし, 繰り返し途中でシフト方向の再チェックを行うことでシフトの不必要な画素を減らすことで適応処理の改善が見られる。これは, オブジェクト内で発生したシフトを行う画素が悪影響を及ぼしていると考えられる。

従来法に比べ, MSE 評価では 59%, MAE 評価で 33% の改善が行われた。

表 1: オプティカルフローの検出精度

方法	MSE(標準偏差)	MAE(標準偏差)
従来法	0.0455 (0.1548)	5.19(9.34)
時間勾配再算出	0.0235 (0.0621)	4.31(6.28)
シフト関数導入	0.0260 (0.0729)	4.31(6.25)
再チェック	0.0187 (0.0650)	3.46(5.65)

## 5 まとめ

オプティカルフローの動領域分割への利用を想定した際に問題になる動きの境界部分付近での検出精度に注目し, その原因として 2 つ挙げた。1 つは, 時間勾配の不正画素である考え, 推定精度改善のために Uncovered, Occlusion 領域での時間勾配の再算出法を提案した。さらに, 動きの境界部分では動きに対するモデルである滑らかさが満たされないと考え, 推定精度改善のためにシフト関数の導入による適応処理法を提案した。2 つの提案方法の有効性を確認するために合成画像に適用したシミュレーション結果から, 視覚的, 客観的評価の両面で有効性を確認できた。今後は, より複雑な動きをしている実画像への適応や動き速度など異なる条件のもとでの適用性について検討を行う。

## 参考文献

- [1] B.K.P.Horn,B.G.Shunck, "Determining optical flow" *Artif. Intell.*,vol.17,pp 185-204,1981.
- [2] J.L.Barron,D.J.Fleet,S.S.Beauchemin,"Performance of Optical Flow Techniques",*Inter.J. Computer Vision*,vol.12(1),pp.43-77,1994
- [3] E.P.Ong,M.Spann, "Robust Optical Flow Computation Based on Least-Median-of-Squares Regression" *Intern. J. Comput. Vis.*,31(1).pp.51-82,1999.
- [4] 金子 豊, 鹿喰善明, 金次保明, 田中 豊, "画像の局所の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] 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.
- [6] S.L.Iu,Y.T.Lin,"Re-examining the Optical Flow Constraint - A New Optical Flow Algorithm with outlier rejection",*IEEE Intern. Conf. Image Proc.*,1999.
- [7] E.P.Simoncelli,"Design of multi-dimensional derivative filters",*Proc. First IEEE Int. Conf. Image Processing*,vol.1,pp.790-794,1994
- [8] M.Otte,H.H.Nagel,"Optical flow estimation : Advances and comparisons",*Lecture Note in Computer Science,ECCV'94,Jan-Olof Eklundh(Ed.)*,vol.800,pp.51-60,1994.