



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	画像の時空間微分算法に基づく速度場計測について : 濃度勾配法と安藤の方法の比較
Author(s)	菅野, 靖洋; Sugano, Yasuhiro; 渋川, 勝久 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 156, 39-50
Issue Date	1991-07-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42292">https://hdl.handle.net/2115/42292</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	156_39-50.pdf



画像の時空間微分算法に基づく速度場計測について  
— 濃度勾配法と安藤の方法の比較 —

菅野靖洋\* 渋川勝久\* 五十嵐悟\*\*  
(平成3年3月30日受理)

**On the Velocity Field Measurement Based on  
Spatio-Temporal Image Derivative**  
— Comparison of Gradient Method and Ando's Method —

Yasuhiro SUGANO, Katsuhisa SHIBUKAWA and Satoru IGARASHI  
(Received March 30, 1991)

**Abstract**

In this report, we treat two methods used for velocity field measurement based on spatio-temporal image derivative: the gradient method proposed by Horn and Schunck, which is used most widely but is costly in computation, and a method proposed recently by Ando, which is based on a computationally efficient algorithm and has the evaluators to judge reliability of the results. We first compare algorithm of the two methods, and attempt introducing the evaluators for the reliability of the results to the gradient method referring Ando's method.

Then we perform computer simulation for several synthetic image sequences to compare the computing time, accuracy and evaluation of reliability of the results of these methods. The results show that Ando's method has the advantages of high computational efficiency, high accuracy and having reasonable evaluators compared with the gradient method.

In both methods, meaningful results cannot be obtained for regions under overmuch velocity conditions. To solve the problem, we propose a simple algorithm in which velocities in such regions are computed from image with reduced resolvability by combining several pixels adjacent to the point in question. Computer simulation shows that for such regions meaningful results can be obtained by applying the proposed method.

**1. 緒 論**

対象の運動が画像上に投影してできる像の流れはオプティカル・フローと呼ばれ、運動物体の認識、立体構造の決定などに利用する研究が盛んに行われている。オプティカル・フローから速

\* 精密工学科 精密機器学第2講座

\*\* 精密工学科 精密加工学第1講座

速度場を求める方法には、対応点探索型の方法と画像の時空間微分に基づく方法がある。対応点探索型の方法は、連続する2枚の画像の一方の特徴点を他方の特徴点に対応付ける方法であるが、対応問題の処理に時間がかかり、また対応誤りによる重大な誤差が混入するなどの欠点がある。これに対して時空間微分に基づく方法は、画像の時間変化が対象の運動のみによって起こるとして導かれる基本拘束条件に、速度場に対するなんらかの拘束条件を加えて速度場を決定する方法である。この方法は数値計算のみで速度分布を求めることができるという明解さと高速性を持つこと、対象に対する予備知識が不要で汎用性と客観性があること、分解能が高いことなどの利点があり、汎用的な速度場計測法として利用できる可能性が高い。

時空間微分に基づく方法のうちで現在最も広く使用されている方法は、HornとSchunck<sup>1)</sup>によって提案された濃度勾配法と呼ばれる方法である。この方法では、基本拘束条件に速度場の滑らかさを考慮して、反復型の解法で速度場が求められる。

これに対して、最近安藤<sup>2)</sup>は、局所的に速度場は一定と近似できると仮定して、時空間微分算法に局所最小2乗推定法を採用し、一度の計算で速度を求めることのできる高速で雑音にも強い方法を提案した。更に安藤はこの解法の解析から、測定可能性、仮定の正当性、測定誤差分散の評価量を定義し、測定結果の信頼性に対する自己判断の基準を与えている。

本報告では、濃度勾配法と安藤による方法の解法を比較することから始め、幾つかのシミュレーションを通して両方法の特徴、算出結果の精度などを比較する。また、濃度勾配法については、滑らかさの相対的な重みの影響について考察し、更に安藤の方法を参考にして測定結果の自己判断の基準となる評価量の導入について検討する。以上の検討から、安藤の方法は、仮定の単純さ、解法の明確さと高速性に加えて、測定精度が高く測定結果の信頼性に対して合理的な自己判断ができるという点で、濃度勾配法に比べて優れた方法であることを示す。

これらの方法では連続した画像間で局所的に微小ずれの仮定が成り立たない部分がある場合、その部分については速度場を求めることができなくなるという共通の問題点がある。この問題を解決する方法の1つとして、局所的に画像の分解能を適当に下げて速度を求める方法を提案し、シミュレーションによってその有効性を確かめる。

## 2. 時空間微分算法に基づく速度場算出法

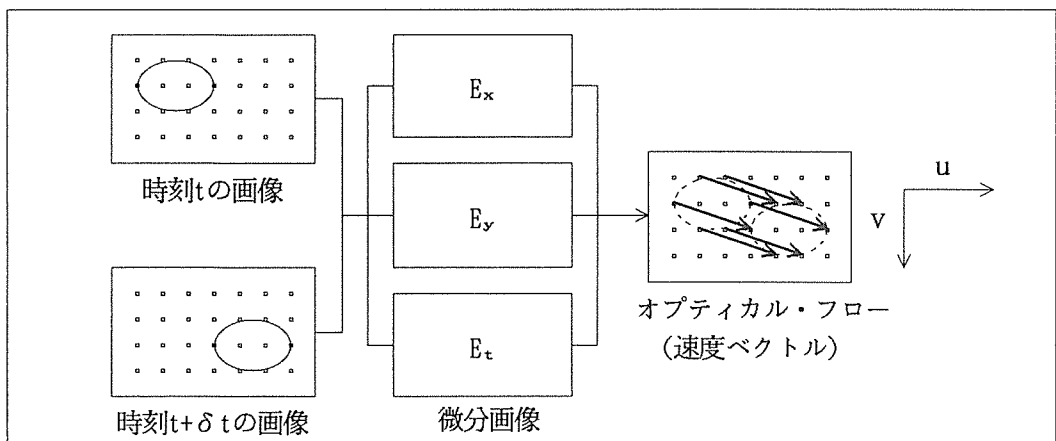


図1 時空間微分算法によるオプティカル・フローの決定

時空間微分に基づくオプティカル・フロー決定問題を模式的に描いたものが図1である。すなわち時刻  $t$  での画像と微小時間  $\delta t$  後の画像から時空間微分画像を求め、適当なアルゴリズムに従って右側の図のような速度分布を求めるのが時空間微分に基づくオプティカル・フロー決定問題である。以下にオプティカル・フローの基本拘束条件と、濃度勾配法および安藤の方法による速度場決定のアルゴリズムについて述べる。

## 2.1 基本拘束条件

時刻  $t$  での画像内のある点  $(x, y)$  の輝度（あるいは濃度）を  $E(x, y, t)$  とする。この点は速度場に従って移動するが、移動中にその輝度は変らないものとする。微小時間  $\delta t$  後にこの点が  $(x + \delta x, y + \delta y)$  に移ったとすると、次式が成り立つ。

$$E(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = E(x, y, t) \quad (2.1)$$

左辺を  $(x, y, t)$  のまわりでテーラー展開すると次式を得る。

$$E(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = E(x, y, t) + E_x \delta x + E_y \delta y + E_t \delta t + \varepsilon \quad (2.2)$$

ここで添え字はその添え字の表す変数での偏微分を意味し、 $\varepsilon$  は  $\delta x$ ,  $\delta y$  および  $\delta t$  の2次以上の高次の項である。式(2.2)を式(2.1)の左辺に代入して  $\delta t$  で割ると  $\delta t \rightarrow 0$  の極限では、

$$E_x u + E_y v + E_t = 0 \quad (2.3)$$

となる。ただし、 $u = dx/dt$ ,  $v = dy/dt$  とおいた。

式(2.3)はオプティカル・フローの基本拘束条件である。基本拘束条件式は1本なので、これだけでは速度成分  $u, v$  を求めることができない。速度分布を求めるには更に拘束条件を加える必要がある。付加する拘束条件は幾つか提案されているが、ここでは本研究で対象とする2つの方法で採用される付加拘束条件と速度の算出方法について述べる。

## 2.2 濃度勾配法

Horn と Schunck によって提案された方法で、「物体上のとなりあった点は似た速度を持ち、画像内の輝度パターンの速度場はほとんど至るところで滑らかに変化する」と仮定する方法である。滑らかさの測度として Horn らは次式を採用している。

$$u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2 \quad (2.4)$$

この値が小さいほど速度場は滑らかとなる。Horn らは基本拘束条件式(2.3)に式(2.4)を考慮して、速度場を求める問題を次式で表される評価関数の最小化問題として定式化した。

$$J = \iint [(E_x u + E_y v + E_t)^2 + \alpha^2 (u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2)] dx dy \quad (2.5)$$

ただし、 $\alpha^2$  は重みである。この評価関数の最小化問題に変分法を適用して、 $u, v$  についての次の方程式が得られる。

$$E_x^2 u + E_x E_y v - \alpha^2 \nabla^2 u + E_x E_t = 0 \quad (2.6)$$

$$E_x E_y u + E_y^2 v - \alpha^2 \nabla^2 v + E_y E_t = 0$$

ここで  $\nabla^2$  はラプラス演算子である。式(2.6)で  $\nabla^2 u$ ,  $\nabla^2 v$  を差分近似して、考えている点のまわりの速度の局所平均 ( $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ) とその点の速度 ( $u, v$ ) との差を使って、次のように表す。

$$\nabla^2 u = \kappa (\bar{u} - u), \quad \nabla^2 v = \kappa (\bar{v} - v) \quad (2.7)$$

ここで  $\kappa$  は定数で、Horn らのアルゴリズムによれば  $\kappa = 3$  である。この近似を用いて式(2.6)を  $u, v$  について解き反復解法の形にすると、最終的に次式を得る。

$$u^{n+1} = \bar{u}^n - \frac{E_x(E_x \bar{u}^n + E_y \bar{v}^n + E_t)}{\kappa \alpha^2 + E_x^2 + E_y^2}, \quad v^{n+1} = \bar{v}^n - \frac{E_y(E_x \bar{u}^n + E_y \bar{v}^n + E_t)}{\kappa \alpha^2 + E_x^2 + E_y^2} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (2.8)$$

初期値は、解が予想できるならその値を用いることによって収束を速めることができるが、予想できないなら0とする。Hornらによれば、 $\kappa \alpha^2$ は輝度勾配が小さな領域に対して、輝度の微分値に含まれるノイズによる算出結果への悪影響を防ぐ重要な働きをする係数であり、 $E_x^2 + E_y^2$ に予想される誤差にほぼ等しくするべきであるとされている。

### 2.3 安藤の方法と算出結果に対する評価量

安藤は「着目点近傍において速度場はほぼ一定と近似できる」と仮定し、局所最小2乗推定の方法を導入して速度を求める方法を提案している。いま近傍領域を $\Gamma$ とすると、 $\Gamma$ 内の至るところでオプティカル・フローの基本拘束条件式(2.3)が成り立っていなければならない。この式の成立の度合を左辺(誤差)の2乗積分で評価し、次式のようにこれを近傍領域ごとに最小化する。

$$J = \iint_{\Gamma} (E_x u + E_y v + E_t)^2 dx dy = \text{minimum} \quad (2.9)$$

評価関数 $J$ を $u$ ,  $v$ に関して微分して0とおくと次式が得られる。

$$\begin{aligned} u S_{xx} + v S_{xy} + S_{xt} &= 0 \\ u S_{xy} + v S_{yy} + S_{yt} &= 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$S_{ij} = \iint_{\Gamma} E_i E_j dx dy \quad i, j = x, y, t$$

式(2.10)を $u$ ,  $v$ について解いて次式を得る。

$$u = \frac{S_{yt} S_{xy} - S_{xt} S_{yy}}{S_{xx} S_{yy} - S_{xy}^2}, \quad v = \frac{S_{xt} S_{xy} - S_{yt} S_{xx}}{S_{xx} S_{yy} - S_{xy}^2} \quad (2.11)$$

近傍領域 $\Gamma$ の大きさは対象の濃淡変化の細かさと速度場計測の分解能との兼ねあいを決める。なお、この方法では濃度勾配法と違い、1度の計算で速度が算出される。

時空間微分に基づく方法で共通した問題点は、微小ずれの仮定が成り立っていない場合、求められた速度は全く意味をなさないが、解からはこれを判断できないことである。この点に関して安藤は、対象の速度がどの程度の範囲内にある場合に実用上十分な測定精度が得られるかを把握し、また対象の速度がその範囲に入っているかを確認する測定結果に対する信頼度の評価法を提案している。

まず、方程式(2.10)が安定して解かれるためには、係数行列の行列式の値が十分大きいことが必要である。行列式の値を次のように $J_{DET}$ と定義する。

$$J_{DET} = S_{xx} S_{yy} - S_{xy}^2 \quad (2.12)$$

この値が大きくなるためには $\Gamma$ 内の濃淡模様が異なる2方向に自由度をもって変化する必要がある。 $J_{DET}$ の大小は、 $\Gamma$ がこの条件を満たしている度合を表し、また $\Gamma$ の大きさ選択の指針を与える。この意味で $J_{DET}$ はその領域での測定可能性を表している。

次に最適条件下での評価関数 $J$ の値を残留誤差の2乗積分 $J_{RES}$ として、次式で定義する。

$$J_{RES} = u S_{xt} + v S_{yt} + S_{tt} \quad (2.13)$$

この量は2枚の画像間の微小ずれ仮定の不成立、画素雑音の存在、 $\Gamma$ 内での速度変動などの判断の基礎情報となる。

最後に、誤差が $E_t$ にだけ含まれるものとするれば、 $J_{RES}$ はおおよそ誤差分散の面積分に等しくなる。この誤差を白色雑音と仮定して、 $u$ ,  $v$ 上での誤差分散を計算し、これを $J_{ERR}$ とおくと次式が

得られる。

$$J_{ERR} = \frac{(S_{XX} + S_{YY})J_{RES}}{(S_{XX}S_{YY} - S_{XY}^2)\Gamma} \quad (2.14)$$

この値は微小ずれ仮定の不成立の度合と領域内の輝度分布から予想される解のばらつきを表し、測定誤差の自己評価量を表すものといえる。

評価は  $J_{DET}$  と  $J_{ERR}$  を用いて行う。 $J_{DET}$  の規定値は、画素雑音のみの寄与により解の分母がとり得る値を評価したものをを用い、次式を測定可能条件とする。

$$J_{DET} \geq (\Gamma \pi^2 \sigma^2) / 2 \quad (2.15)$$

ここで  $\sigma^2$  は画素雑音の分散である。 $J_{ERR}$  による評価では最低限許容できる絶対誤差  $A_{ABS}$ 、あるいは相対誤差  $A_{REL}$  を前もって定め、次式を満たさない測定点を算出結果から除外する。

$$J_{ERR} \leq A_{ABS}^2 \text{ OR } J_{ERR} \leq A_{REL}^2 (u^2 + v^2) \quad (2.16)$$

これらの判断に従って領域を次の3種に分類する。1) 測定条件が適切で信頼できる速度が得られた領域、2) 濃淡模様が存在からは測定は可能と判断されるが、速度が過剰なため信頼できる測定が行われなかった領域、3) 対象上に適切な濃淡模様がなく測定が不可能な領域。領域をこのように分類した上で、2) の領域が多く生じた場合は撮影時間間隔を短くして画像のずれを抑え、3) の領域が多く生じた場合は近傍領域の大きさを広げるなどの対策をとる。

### 3. 算出法の検討と考察

#### 3.1 濃度勾配法における $\kappa\alpha^2$ 選択の基準

前述のように濃度勾配法における  $\kappa\alpha^2$  (基本拘束条件に対する滑らかさの拘束条件の相対的な重み) 選択の基準は、Horn らによれば  $E_x^2 + E_y^2$  に予想される誤差にほぼ等しくするべきであるとされている。しかし Horn らは具体的に  $\kappa\alpha^2$  を決定する方法を述べておらず、実際の測定では試行錯誤によって決めているのが現状である。そこでここでは  $E_x^2 + E_y^2$  に予想される誤差を次の方法で見積もり、 $\kappa\alpha^2$  の値をこの誤差と同程度に選ぶことの妥当性を調べる。

ある被写体を撮影した画像を複数枚用意し、各画像について各点で  $E_x^2 + E_y^2$  の値を求める。各点でのそれらの平均値を真の  $E_x^2 + E_y^2$  の推定値として、誤差の分散  $\sigma^2$  を求め、 $3\sigma$  を  $E_x^2 + E_y^2$  に予想される誤差として見積もる。 $\kappa\alpha^2 = 3\sigma$  とすることの妥当性は、 $\kappa\alpha^2$  の算出結果への影響と共に後のシミュレーションで検討する。

#### 3.2 安藤の方法における近傍領域の大きさ

安藤の方法では画像内の着目点の近傍で速度場はほぼ一定と近似できると仮定して、近傍領域  $\Gamma$  内のデータを連立して1つの速度を決定しているが、この  $\Gamma$  の大きさは被写体の濃淡模様の細かさと速度場測定の空間分解能との兼ねあいで決めるとされている。すなわち、式(2.15)による判断の結果をもとに次の方法で最適な  $\Gamma$  の大きさが決められる。 $J_{DET}$  の値に余裕がある場合は  $\Gamma$  を小さくして分解能と近傍領域内の速度均一性を向上させ、 $J_{DET}$  の値が十分な値を持たないときは  $\Gamma$  を大きくして濃淡模様が  $\Gamma$  内で異なる2方向に変化するようにする。しかし、 $\Gamma$  の大きさは測定可能性と分解能に影響を与えるばかりでなく、式(2.14)に示した  $J_{ERR}$  からも明らかなように算出結果の精度にも影響を与える。

本研究では近傍領域  $\Gamma$  の大きさと  $J_{DET}$  の値、および算出結果の精度との関係を後述のシミュレーションによって検討する。

#### 3.3 濃度勾配法への評価量の導入とその検討

濃度勾配法には安藤が導入しているような算出結果に対する評価量はない。そこで本研究では安藤の評価量を参考にし、濃度勾配法に新しく評価量を導入することを検討する。濃度勾配法でも解が安定して解かれるためには式(2.8)の分母が十分大きいことが必要である。安藤の方法にならって式(2.8)の分母を $J_{DET}$ とする。

$$J_{DET} = \kappa\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2 \quad (3.1)$$

この値が $E_x^2 + E_y^2$ に予想される誤差より小さければ速度が安定して解けない可能性がある。すなわちこの値はその画素での測定可能性を表していると考えられる。しかし、濃度勾配法では画像の輝度の変化が乏しい場合でも、 $\kappa\alpha^2$ を $E_x^2 + E_y^2$ に予想される誤差程度にしておくことによってあらかじめ測定可能性を保証していることになる。

次に $u$ ,  $v$ が最適値(収束値)だとして基本拘束条件の残留誤差を次式で表す。

$$J_{RES} = E_x u + E_y v + E_t \quad (3.2)$$

安藤の方法と同様に $E_t$ にのみ誤差が含まれているとすると、式(3.2)は $E_t$ の誤差 $\varepsilon$ にはほぼ等しい。いま速度 $u$ ,  $v$ 上での誤差を $\xi$ ,  $\eta$ とすればこれらは次式で表される。

$$\xi = \bar{\xi} - \frac{E_x[E_x\bar{\xi} + E_y\bar{\eta} + \varepsilon]}{\kappa\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2}, \quad \eta = \bar{\eta} - \frac{E_y[E_x\bar{\xi} + E_y\bar{\eta} + \varepsilon]}{\kappa\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2} \quad (3.3)$$

$\varepsilon$ に式(3.2)を使えば、式(3.3)から誤差 $\xi$ ,  $\eta$ は繰り返し計算によって求めることができる。より簡単にこれらの誤差を求めるには、式(3.3)で近傍領域での誤差の平均値 $\bar{\xi}$ ,  $\bar{\eta}$ を0と仮定して次式を得る。

$$\xi = -\frac{E_x\varepsilon(x, y)}{\kappa\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2}, \quad \eta = -\frac{E_y\varepsilon(x, y)}{\kappa\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2} \quad (3.4)$$

この誤差の2乗和 $\xi^2 + \eta^2$ を $J_{ERR}$ とおくと、 $J_{ERR}$ は次式で表される。

$$J_{ERR} = \frac{(E_x^2 + E_y^2)J_{RES}^2}{(\kappa\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2)^2} \quad (3.5)$$

濃度勾配法では、 $J_{DET}$ は測定可能性を保証しているので、 $J_{ERR}$ のみを用いて評価を行う。 $J_{ERR}$ が規定値を越える場合を算出結果の信頼性が低いと判断する。

ここで問題になるのは式(3.5)に入っている $\kappa\alpha^2$ の働きと $J_{ERR}$ の意味である。まず $\kappa\alpha^2$ を大きくすると $J_{ERR}$ は小さくなり、どんな状態でも信頼性が高いと判断されてしまう。次に式(3.5)は基本拘束条件のみの残留誤差であり、滑らかさの測度は考慮されていない。すなわち、式(3.5)の $J_{ERR}$ は基本拘束条件のみを考慮した誤差分散の推定値であり、速度場の滑らかさも考慮した速度場の誤差分散とはなっていない。その意味では式(3.5)の $J_{ERR}$ は安藤の評価量( $J_{ERR}$ )とは異なるが、誤差の大小の評価には有効であろうと思われる。なお濃度勾配法では、式(2.5)で与えられる評価関数が画像全領域にわたる積分で表されているので、各点での算出結果に対して基本拘束条件と滑らかさの測度の両方を考慮した誤差の評価量を導出することは困難である。

導入した評価量は後のシミュレーションでその有効性を調べる。

### 3.4 画像のずれが過剰な場合に起こる問題への対策

濃度勾配法、安藤の方法の両方に共通した問題として、扱う画像がずれの大きな部分を含み微小ずれの仮定が成り立たない場合、その部分では意味のある速度が算出されないことがあげられる。そこでこの場合の対策として、画像のずれが過剰な部分に対してその部分の画像の分解能を適当に低くすることによって速度場を求める方法を提案する。すなわち部分的に画像のずれが過剰でその部分の速度が算出されていない場合、その部分の幾つかの画素の集合を新しい画素とし

て、相対的に画像のずれを小さくすることによって速度場を求める方法である。この方法は濃度勾配法および安藤の方法のいずれに対しても有効である。またこの方法は、より正確な速度場を求めるために画像を撮影し直す場合の撮影時間間隔を決定する際にも有効に利用できる。

この方法の有効性は後のシミュレーションで検討する。

#### 4. シミュレーションによる検討と実測例

濃度勾配法における  $\kappa\alpha^2$  の算出結果への影響や、導入した評価量の有効性、安藤の方法における近傍領域と算出結果の関係を調べることで、また、濃度勾配法と安藤の方法による算出結果の精度を比較すること、および画像ずれが過剰な場合への対策の有効性を検討することを目的として、シミュレーションを行った。

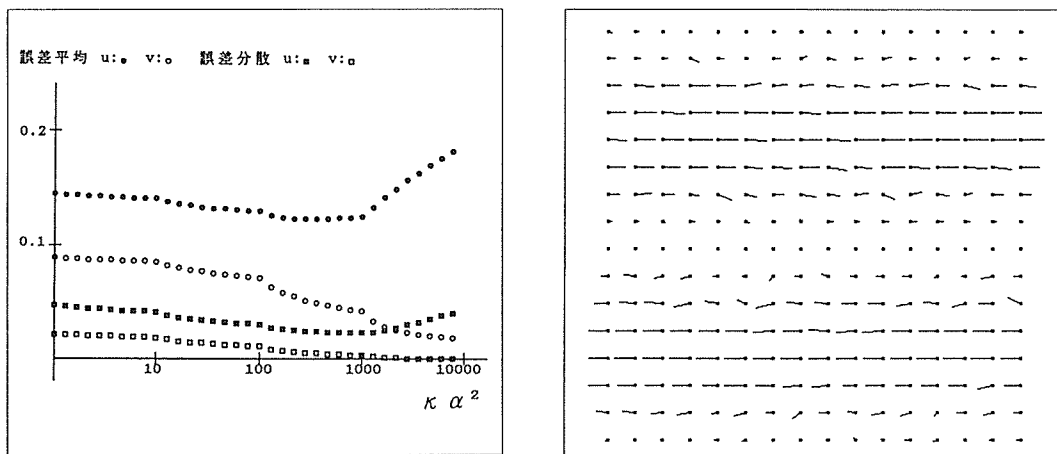
シミュレーションで使用する画像データは、 $32 \times 32$  画素、256 階調の画像とし、濃淡パターンはランダムパターンを採用した。実際に CCD カメラでランダムパターンを撮影した画像を時刻  $t$  での画像とし、 $t + \delta t$  での画像は速度場に対応する濃淡パターンを計算して用いた。座標系は横方向に  $x$  軸、縦方向に  $y$  軸をとり、速度場は  $v=0$  として、 $u$  のみが正弦波状あるいは放物線状に変化する速度場を用いた。規定値は安藤の方法での  $J_{DET}$  の規定値を  $2.46 \times \Gamma$  (実画像によって解の分母への画素雑音の寄与を評価した値)、 $J_{ERR}$  の規定値を 0.125 とした。濃度勾配法での  $J_{ERR}$  の規定値は後述のシミュレーションで検討する。

濃度勾配法では、各画素において  $u, v$  の値が前回計算された値と小数点以下第 5 位まで一致したとき収束したと判断した。

算出結果は 1 画素おきに表示し、速度ベクトルの表示法は各画素を起点として速度の大きさを長さとし、速度の向きに引いた線分を表示する。時間の単位は 2 枚の画像のフレーム間隔、長さの単位は画素の間隔とした。ただし、 $J_{DET}$  が規定値以下の場合に対応する画素に小さな点を打ち、 $J_{ERR}$  が規定値を越えた場合は線分を破線で表示する。

##### 4.1 濃度勾配法における $\kappa\alpha^2$ の影響

速度場の算出結果に及ぼす  $\kappa\alpha^2$  の影響を調べて Horn らによる  $\kappa\alpha^2$  の値の選択法の妥当性を



(a) 誤差平均, 誤差分散

(b)  $\kappa\alpha^2=500$  のときの算出結果

図 2 濃度勾配法における  $\kappa\alpha^2$  の精度への影響

検討した。まず、ランダムパターンを撮影した画像を10枚用いて、3.1で述べた方法によって分散  $\sigma^2$  を求め、 $3\sigma \doteq 500$  を得た。次に  $\kappa\alpha^2 = 3\sigma$  に選ぶことの妥当性を検討するため濃度勾配法によって速度場を求める問題を、 $\kappa\alpha^2$  の値を1~10000の範囲で変化させて解いた。速度場は振幅1.0画素、周期32画素で正弦波状に変化する速度場を用いた。画像全体での誤差平均と誤差分散を図2(a)に示す。縦軸は誤差の絶対値の平均と誤差分散を、横軸は  $\kappa\alpha^2$  の値を表す。 $\kappa\alpha^2$  の値を大きくするにしたがって速度場は滑らかとなり、誤差は低下するが、このグラフからわかるようにある程度以上大きくすると精度が悪くなり、結果的に  $\kappa\alpha^2$  の値を数100程度に選んだときに誤差平均、誤差分散が最も小さくなるのがわかる。図2(b)に  $\kappa\alpha^2 = 500$  としたときの結果を示す。速度の小さいところでは量子化誤差などのため若干精度が悪いが、そのほかは精度のよい結果が得られており、 $\kappa\alpha^2 = 3\sigma$  とすることが妥当であることがわかった。したがってこれ以後の計算では  $\kappa\alpha^2 = 500$  とする。

#### 4.2 安藤の方法における近傍領域の大きさの影響

4.1で使った画像を用いて、安藤の方法での近傍領域の大きさと  $J_{DET}$  の値、および精度との関係を調べた。近傍領域を3, 5, 7, 9画素平方にとったときの  $J_{DET}$  の値を調べた。まず、 $\Gamma$  を小さくするほど  $J_{DET}$  の値は小さくなったが、今回のシミュレーションで用いた画像では全ての画素で  $J_{DET}$  の値は規定値 ( $2.46 \times \Gamma$ ) を越えていた。次にそれぞれの近傍領域について、画像全体での算出速度の誤差平均と誤差分散を求め、その結果を図3(a)に示した。ここで与えた  $J_{ERR}$  の規定値 (0.125) による判断からは近傍領域として3画素平方をとることも可能であるが、5画素平方で誤差が最も小さいことがわかる。従ってこれ以後の計算では  $\Gamma$  は5画素平方とする。なお、近傍領域を5画素平方にとったときの算出結果を図3(b)に示す。

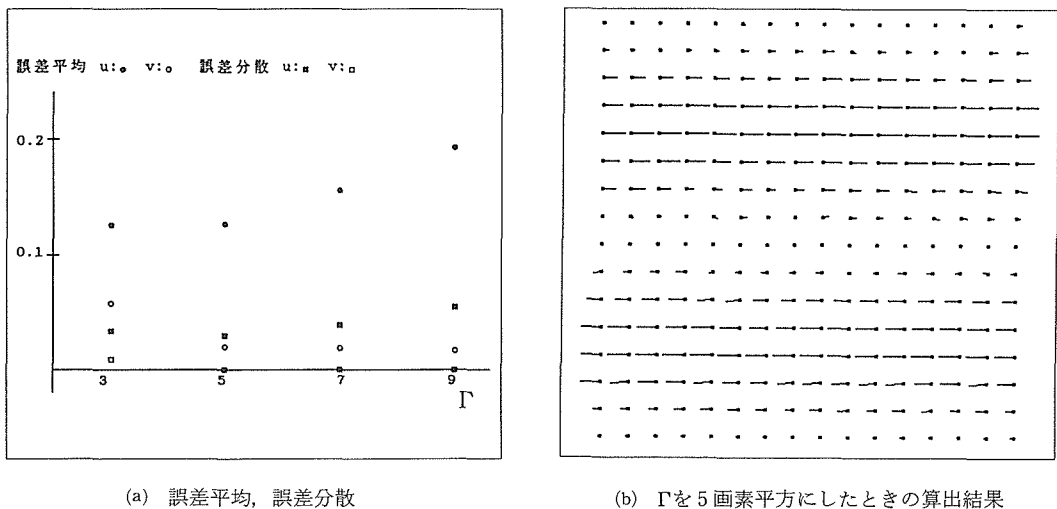


図3 安藤の方法における近傍領域の大きさと精度の関係

#### 4.3 濃度勾配法に導入した評価量と評価の検討

微小ずれの仮定が成り立っていない画像データに対する算出結果を用いて、安藤の方法、および濃度勾配法に導入した評価量の有効性を検討する。中央で最大1.7画素のずれを持った放物線分布の速度場に対する両方法による算出結果を図4に示す。

図4(a)の安藤の方法では、ずれの特に大きい中央付近で微小ずれの仮定が成り立たず、 $J_{ERR}$  が規定値を越えており、評価が正しく行われていることがわかる。図4(b)は濃度勾配法で  $J_{ERR}$  の規定値を0.05としたときの結果である。この場合誤差の大きい画像中央部分での算出結果は規定値を越えており、安藤の場合と似た評価ができていることがわかる。しかし、規定値を安藤の場合と同じ値(0.125)にしたところ、 $J_{ERR}$  はこの規定値を越えず正しい評価ができなかった。これは、3.3で述べたように濃度勾配法と安藤の方法の評価関数の意味が異なっており、安藤と同様な評価は困難であることによると考えられる。この結果から、規定値を適当な値に選べば、実際の誤差との関係は明確ではないが、濃度勾配法に導入した評価量( $J_{ERR}$ )によって安藤の場合と似た評価ができることがわかった。

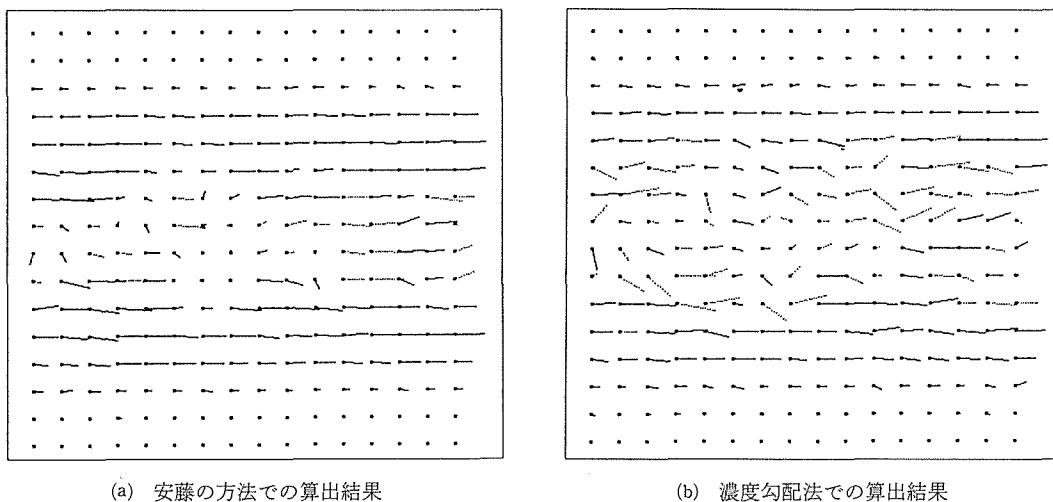


図4 両方法による算出結果とその評価の比較

#### 4.4 濃度勾配法と安藤の方法による算出結果の比較

速度の大きさが正弦波状に変化する速度場を用いて、濃度勾配法と安藤の方法による算出結果

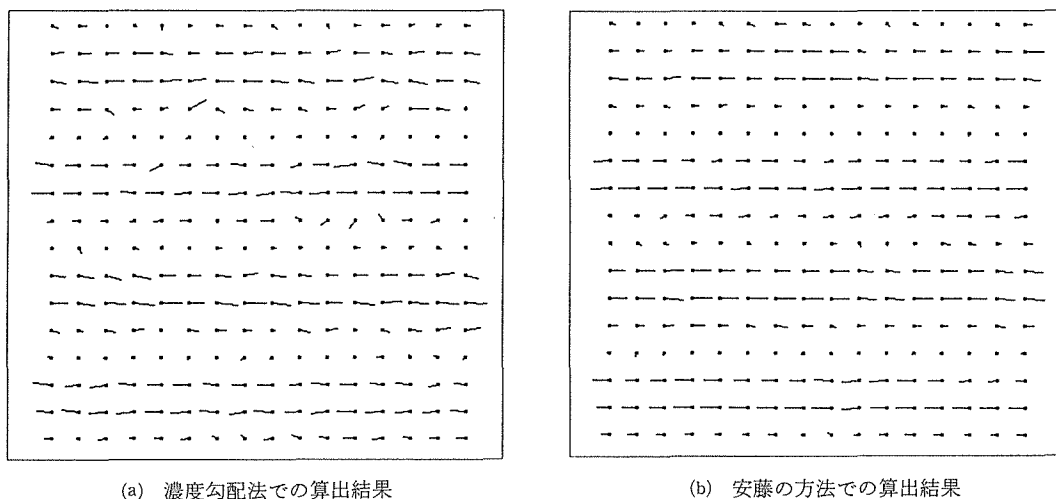
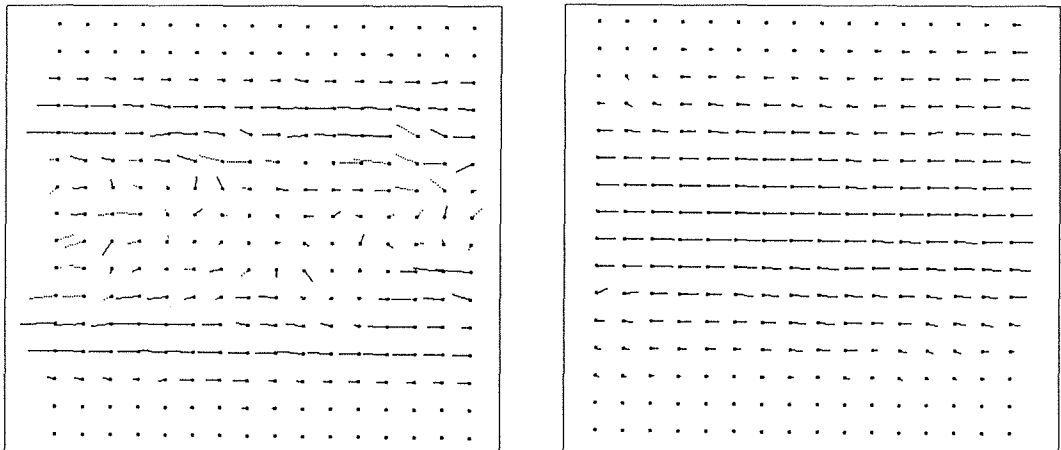


図5 濃度勾配法と安藤の方法による精度の比較

の精度を比較した。一例として振幅 1.0 画素，周期 16 画素の場合の結果を図 5 に示す。(a) は濃度勾配法での結果，(b) は安藤の方法での結果である。安藤の方法での速度場変動に対する拘束条件は濃度勾配法に比べて厳しいので，算出された速度場は濃度勾配法に比べて精度が低いと予想された。もしそうであれば，濃度勾配法の初期値として，安藤の方法で求めた速度場を利用する方法が考えられる。しかし，図 5 から明らかなように，今回扱った範囲では安藤の方法での算出結果が濃度勾配法の算出結果よりも精度が高かった。また，濃度勾配法では解が収束するまで約 50 回反復を必要としたのに対し，安藤の方法では 1 度の計算で解が求められるため，計算時間は濃度勾配法の約 1/3 で高速性の点でも安藤の方法が優れていた。更に，安藤の方法には算出結果の信頼度を評価する合理的な評価量があり，この評価量を使って算出結果の信頼度をほぼ正しく判断できるという点でも，安藤の方法は濃度勾配法に比べて優れていることがわかった。

#### 4.5 画像のずれが過剰な場合に起こる問題への対策

画像のずれが過剰な場合，図 4 に示したようにいずれの方法でも意味のある速度場を求めることができないが，画像の分解能を適当に低くすることによって速度場を求めることができることを示す。ここでは安藤の方法に対してこの方法を用いる。図 6 (a) は最大ずれが 2.0 画素の放物線分布の速度場をそのままの分解能で求めた結果であり，前述のように画像ずれの大きい中央部分では実際とは全く異なる結果が得られ， $J_{ERR}$  が規定値を越えている。そこで，隣接する 4 つの画素データを平均したものを 1 つの画素データとし，もとの画像データの分解能を 1/4 にして速度場を求めたのが図 6 (b) である。ただし，画像データがもとの 1/4 の大きさになっているので結果は画素ごとに表示し，速度の大きさは図 6 (a) の 1/2 で表示した。この場合は中央部分でも算出された速度は実際の速度に近く， $J_{ERR}$  は規定値以下である。このようにもとのままでは速度が過剰な場合でも分解能を適当に下げて速度分布を求めることができることがわかる。ここでは全画像の分解能を低くして速度場を求めたが，局所的に速度が過剰と判定された領域を持つ画像に対して，その領域に限定してこの方法を適用することもできる。また，対象の運動が定常的なものであれば，このような領域の速度を正確に測定するために撮影時間間隔を短く設定して対象を撮影し直す際の時間間隔の決定にも，この方法で求めた速度を利用することが可能である。なおこの方法は濃度勾配法に対しても有効である。



(a) 元の分解能での算出結果

(b) 分解能を 1/4 にしたときの算出結果

図 6 画像のずれが過剰な場合に起こる問題への対策

#### 4.6 実測例

実際に運動している対象を CCD カメラで撮影し、安藤の方法で速度場を算出する実験を行った。例として回転する円板についての結果を図7に、水流についての結果を図8に示す。図7の円板の場合、中央部分から外側へ向かって速度が大きくなっているが、全く動いていない背景との境界部分では速度が滑らかに変化していないため、算出結果が乱れていて、 $J_{ERR}$  によって算出結果の信頼度が低いと評価されている。図8はインクを溶かした水にアルミの粉末をまき、左下部分から風を送って図9に示すような流れを起こしたときの速度場の算出結果である。全領域が、測定条件が適切で信頼できる速度が得られた領域と判断されている。この場合のように濃淡変化や画像のずれなどの条件が適切であれば、実際の現象がほぼ正しく測定できていることがわかる。図示しないが、このような条件の場合には濃度勾配法を用いても同様な結果が得られる。

#### 5. 結 論

時空間微分算法に基づく速度場算出方法のうち、現在最も広く用いられている濃度勾配法と、最近安藤によって提案された方法を取り上げ、算出方法の比較検討を行うと共に、両方法による算出結果の精度を比較し、次の結論を得た。

1. 濃度勾配法と安藤の方法を比較した結果、今回扱った範囲では、以下の点で安藤の方法が優れていることがわかった。
  - ①濃度勾配法の仮定に比べ安藤はより拘束の強い仮定を用いているにもかかわらず、安藤の方法での算出結果は濃度勾配法での算出結果よりも精度が高い。
  - ②濃度勾配法では反復解法で解を求めるのに対して、安藤の方法では1度の計算で近傍領域の速度を算出するため極

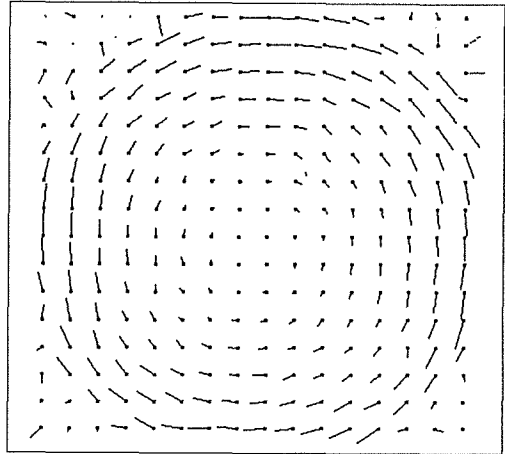


図7 回転円板の速度場

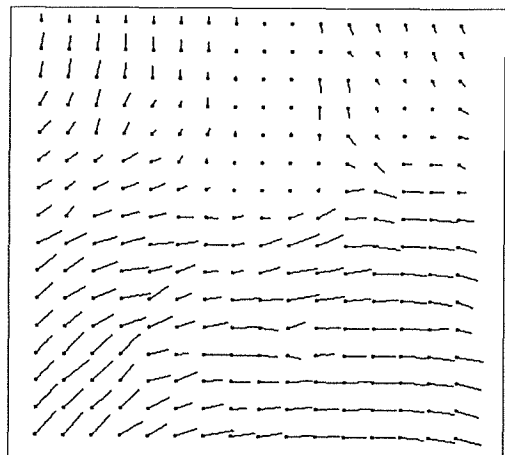


図8 水流の速度場

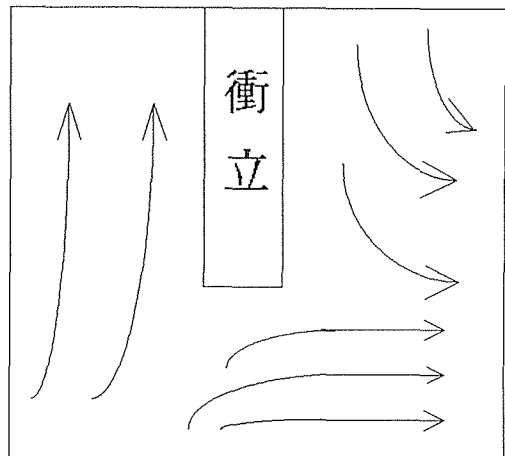


図9 水流の模式図

めて高速に解が得られる。

③安藤の方法では算出結果の信頼性を合理的に自己判断することができる。

2. 濃度勾配法に対して，解(式(2.8))の分母への画素雑音の寄与を，画像データを使って見積り， $\kappa\alpha^2$ (基本拘束条件に対する速度場の滑らかさの拘束条件の相対的な重み)の値をこの寄与にほぼ等しく選んだ場合に，算出結果の誤差が最小になることをシミュレーションによって示し，Horn らの推奨が妥当であることを確かめた。
3. 安藤の評価量を参考にして，濃度勾配法に算出結果の自己評価量を導入し，規定値を適当に与えることによって安藤の評価と似た評価ができることを示した。
4. 画像内のある部分の速度が大きく，与えられた撮影時間間隔に対してその部分の画像のずれが過剰な場合，その部分の分解能を適当に下げて速度分布を求める方法を提案し，シミュレーションによってこの方法の有効性を確かめた。

## 謝 辞

本研究に対しご協力頂いた，日本アビオニクス(株)電子機器事業部第一画像，鶴川洋課長に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) B. K. P. Horn and B. G. Schunck: Artificial Intelligence, 17(1981), p. 185~203
- 2) 安藤 繁：計測自動制御学会論文集，22, 12(1986)，p. 1330~1336