

動画像からのオプティカルフローの検出

正員 古賀 和利[†] 正員 三池 秀敏^{††}

Determining Optical Flow from Sequential Image

Kazutoshi KOGA[†] and Hidetoshi MIIKE^{††}, Members

あらまし 多数の粒子の運動をとらえた連続的な動画像より、個々の粒子の移動に起因したオプティカルフローのベクトル場を正確に解析する手法を提案する。これは、我々が従来提案してきた画素時系列間の相互相関解析による速度ベクトル場の計測法を発展させたものである。運動物体が、剛体で中心対称な輝度分布をもつという仮定のもとで、8ないし16近傍との相互相関関数のラグタイムより速度ベクトルが解析的に厳密に決定できる。この解析法の有効性は計算機シミュレーションにより作成した動画像を用いて確認した。速度ベクトルの絶対値(速さ)および方向角の決定精度は、粒子の重なりがない場合、各々の分布のヒストグラムの半値幅で評価して、それぞれ ± 0.005 pixel/frame, $\pm 1^\circ$ 以内であり、十分な精度を得ることができた。また、粒子が重なって並進運動を行う場合でも、速さの精度は同じ程度であり角度の精度も 6° 程度の値が得られた。

1. ま え が き

現在、動画像より運動物体の速度の情報を計測する手法は、医学・工学をはじめ非常に広い分野で研究され、その計測法の確立が望まれている。例えば、乱流を含む可視化された流れの場の解析⁽¹⁾、あるいは心臓や血管中の血液の流れ⁽²⁾、また、顕微鏡下の細菌の活性度の解析⁽³⁾に対して、動画像処理を利用した種々の計測法が開発されつつある。

一般に、画面内の物体の移動に伴う輝度分布の移動を示す速度ベクトル場は、オプティカルフローとして知られている。近年、知能情報処理の分野では、ロボットビジョンやオートナビゲーションを目指して、このオプティカルフローを利用した3次元認識(奥行き、形状の知覚)の試みが数多く報告されている^{(4)~(6)}。

動画像からオプティカルフローを求める方法としては、大きく分けて二つの方向がある。一つは、画像中の特徴点を見出し、画像フレーム間で対応点を探し速度ベクトルを決定するマッチング法^{(7),(8)}である。もう一つは、動画像中の運動物体の輝度の時間変化と空間変化に一定の関係があることを利用する方法、いわゆる

グラディエント法である^{(4),(9),(10)}。これらの解析法は、多く研究者により改良が進められているが、速度ベクトルの決定精度等を定量的に明らかにしたものは、我々の知る限りでは見当たらない。

我々は、最近、動画像より速度ベクトルを自動的かつ比較的正確に決定する方法として、着目する画素の輝度変化の時系列と、その近傍画素(5×5または3×3)の時系列との相互相関解析をもとにした方法を提案して改良を進めてきた^{(11)~(13)}。この方法では、動画像中の物体の移動を直接追跡する必要はなく、マッチング法のような画像中の特徴点の自動認識といった困難な問題は発生してこない。また、物体が通過し相互相関関数が計算可能な画素では、そのほとんどで速度ベクトルを決定することが可能である。しかしながら、これまで速度ベクトルの方向を決定するために用いてきた方法は、あくまで近似的なものであり改良の余地が残されていた。

本報告では、対象とする動画像中の物体の輝度分布が中心対称であるという仮定のもとで、速度ベクトルの方向およびその絶対値を決定する厳密解を示す。さらに、計算機シミュレーションによる数種の動画像の解析によって、我々が従来提案してきた方法との解析精度の比較を定量的に行い、ここで提案した新しい方法の有効性を確認できたもので併せて報告する。

[†] 山口大学工業短期大学部情報処理工学科, 宇部市
Technical College, Yamaguchi University, Ube-shi, 755 Japan
^{††} 山口大学工学部電気工学科, 宇部市
Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube-shi, 755 Japan

2. 解析原理

2.1 基本解析

本報告の相互相関解析の前半の手続きは、これまで報告してきた方法⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾と基本的には同様であるが、相互相関関数の正規化の方法などに改良を加えたので、以下、その手順を改めて詳細に述べる。

我々の採用した解析法の基本は、従来、他の多くの手法で用いられているような運動物体そのものを追跡することなく、運動物体が通過して行くことによりある固定された場所(画素)に起こる輝度変化の信号を観測して、その場所の速度ベクトルを決定することにある。Horn & Schunck⁽⁹⁾らが指摘しているように、空間の一点における輝度の変化の情報のみからは速度ベクトルの決定は不可能である。そこで、我々は、解析したい場所(画素)とその近傍の場所(画素)における輝度の時間変化の相互相関を調べることにより速度ベクトルを決定する方法を追及してきた。

まず、図1のように解析の対象となる中心画素 0 および近傍画素(1, 2, ..., 1', 2', ...)を定める。このとき 5×5 (または 3×3)画素の局所領域内では速度は一定と仮定する。各画素の速度ベクトルの決定は中心画素の輝度変化の時系列 $A_0(t)$ とその周囲の近傍16画素(または8画素)の時系列 $A_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, 1', 2', \dots$)との輝度時系列間の相互相関関数

$$M_0^k(\tau) = 1/T \int_0^T (A_k(t) - \bar{A}_k)(A_0(t) - \bar{A}_0) / S_{nn} \cdot dt \quad (1)$$

を計算する。ここで \bar{A}_k は、 k 方向の時系列 $A_k(t)$ の平均値である。また、規格化のための S_{nn} は、中心画素および k 方向近傍画素の時系列の分散のうち大きい方の値、すなわち

$$S_{nn} = \text{Max}(S_0^2, S_k^2) \quad (2)$$

ここで

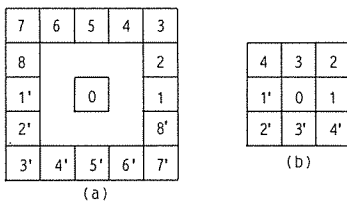


図1 解析対象画素および近傍画素の位置関係
(a) 16近傍画素を用いる場合, (b) 8近傍画素を用いる場合
Fig. 1 A target pixel '0' of velocity analysis and its neighboring pixels '1, 2, ..., 1, 2, ...'.
(a) Neighboring 16 pixels, (b) Neighboring 8 pixels.

$$S_k^2 = 1/T \int_0^T (A_k(t) - \bar{A}_k)(A_k(t) - \bar{A}_k) \cdot dt \quad (3)$$

である。この値を用いることにより、通常用いられる二つの時系列の分散の積の平方根

$$S_{0k} = \sqrt{S_0^2 \cdot S_k^2} \quad (4)$$

で規格化を行う場合に比べて、輝度時系列の振幅の違いを相関関数の値の大小に反映できる利点がある。

次に、求めた各方向の相互相関関数の内で、ちょうど反対方向となる $M_0^k(\tau)$ と $M_0^{k'}(\tau)$ の一方を時間軸を逆にして幾何平均をとる。

$$\gamma^{kk'}(\tau) = \sqrt{M_0^k(\tau) \cdot M_0^{k'}(-\tau)} \quad (5)$$

但し、根号の中が負の場合は、剛体粒子(時間的に輝度分布が不変)の運動に伴う中心画素と近傍画素との間のラグタイムを考える上では無意味な情報と考えゼロと置いた。現実の動画像を処理した場合、相互相関関数は単ピークの単調な波形ではなく複数の小さなピークが見られる。式(5)のような反対方向の相関関数の幾何平均をとることにより、その画素での大局的な物体の移動方向に起因する相互相関関数のピークのみを残して解析を進めることができる。

最後に、こうして得られた相互相関関数の幾何平均 $\gamma^{kk'}(\tau)$ より、 k 方向のピーク値 γ_k およびそのときのラグタイム τ_k を求める。

我々が最初提案した方法では、このようにして得られた16方向(または8方向)の γ_k の中から最大のものを選び出し、その方向を速度ベクトルの方向とした^{(11),(12)}。しかし、このままでは、16近傍画素を採用しても求められる速度ベクトルの方向は非常に粗いものとなる。また、決定された方向を i としたとき、その方向のラグタイム τ_i を用いて

$$v = d_i / \tau_i \quad (6)$$

で求められる速さ v も誤差を含んだものとなる。従って速度ベクトルの決定精度は十分とは言い切れなかった。

2.2 速度ベクトルの決定法[†]

ここで、解析の対象である動画像中の物体を中心対称な輝度分布をもつ粒子に限定し、2.1で得られた k 方向の相互相関関数の幾何平均 $\gamma^{kk'}(\tau)$ の最大値 γ_k およびそのラグタイム τ_k についてもう少し考察を進める。

図2は一つの粒子が解析の対象である画素の近傍を

[†] 基本原理については、研究速報として現在投稿中。

K. Koga, H. Miike and M. Momota: "Exact determination of optical flow by pixel-based temporal mutual-correlation analysis", Trans. IEICE.

角度 α の方向に通過する様子を示している。中心画素を o 、画素 o から見て粒子の移動方向にある近傍画素をそれぞれ i, j とする。粒子の運動に伴う中心画素 o および近傍画素 i, j での輝度の時間変化は、それぞれの画素を通り、粒子の進行方向に平行な波線 l_o, l_i, l_j で切断される粒子の空間的輝度の変化を、画像間のフレーム間隔でサンプリングしたものとなる。その輝度変化の様子を模式的に図 2(b)に示した。 f_o, f_i, f_j はそれぞれ画素 o, i, j での輝度変化に対応する。各々の輝度のピークは、図 2(a)の粒子上に示した点 a, b, c がそれぞれ画素 o, i, j を通過したときに対応する。従って、 f_o と f_i, f_o と f_j の各時系列間の相互相関関数より求められるラグタイム τ_i, τ_j は、粒子上の点 a が画素 o を通過してから、粒子上の点 b, c がそれぞれ画素 i, j を通過するまでの時間を表すことになる。

以上のことから、ある画素の速度ベクトルの絶対値(速さ) v およびその方向角 α と、解析対象の画素から近傍画素までの画素間距離 d_i, d_j には図 3(a)のような幾何学的関係が成立する。すなわち、進行方向に近い二つの画素 i, j のラグタイム τ_i, τ_j を用いて

$$v\tau_i = d_i \cos(\theta_i - \alpha) \tag{7}$$

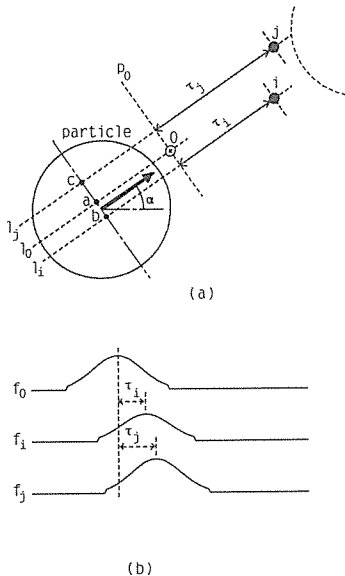


図 2 粒子の移動と、それに伴う解析対象画素および近傍画素の輝度変化の時系列 (a)解析対象画素付近の粒子通過の様子 (b)解析対象画素および近傍画素の輝度の変化
Fig. 2 A particle motion and temporal brightness change at the target pixel and that at neighboring pixels. (a) Passage of a moving particle near by the target pixel and its neighboring pixels. (b) The temporal brightness changes at each pixel.

$v\tau_j = d_j \cos(\theta_j - \alpha)$ (8) を得る。ここで、 θ_i, θ_j は中心画素 o を原点とした画素 i, j の方向角である。

また、これを画素 o での真の速度ベクトル \vec{v} と、画素 o から画素 j, k の方向へ向かう見かけ上の速度ベクトル \vec{u}_i, \vec{u}_j の関係で示したのが図 3(b)である。これを式で示すと

$$v = u_i \cos(\theta_i - \alpha) = u_j \cos(\theta_j - \alpha) \tag{9}$$

ここで

$$u_i = d_i / \tau_i, \quad u_j = d_j / \tau_j \tag{10}$$

となる。式(7), (8)または(9), (10)の関係から v, α を未知数として解くと

$$v = \frac{u_i u_j \sin |\theta_i - \theta_j|}{\sqrt{u_i^2 + u_j^2 - 2u_i u_j \cos(\theta_i - \theta_j)}} \tag{11}$$

$$\tan \alpha = (u_i \cos \theta_i - u_j \cos \theta_j) / (u_i \sin \theta_i - u_j \sin \theta_j) \tag{12}$$

として速度ベクトルが求まる。

ここで注意が必要なのは、式(5)で与えられる関数 $\gamma^{kk'}(\tau)$ のピーク値 γ_k およびそのときのラグタイムとして得られる τ_k は、別の粒子がそれぞれの画素を通過した場合でも計算上は求まるといことである。従って、

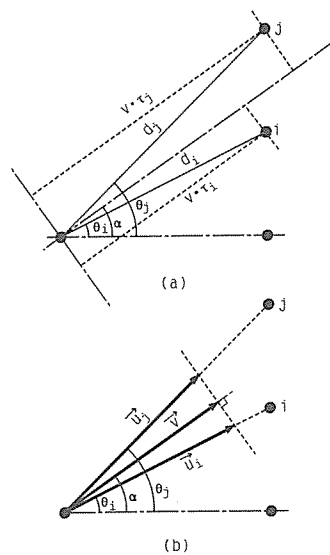


図 3 幾何学的関係による速度ベクトルの決定 (a)速さとラグタイムおよび近傍画素間パラメータの幾何学的関係 (b)真の速度ベクトルと見かけ上の速度ベクトルの関係
Fig. 3 Estimation of exact velocity using lag-times and geometric parameters. (a) Geometric relations among the particle speed, lag-time and spatial parameters. (b) Vector relation between the true velocity \vec{v} and the apparent velocity \vec{u}_i, \vec{u}_j .

真に粒子の移動を反映したラグタイムであるかを判定する必要がある。この判定には絶対的な方法は見出せないが、 γ_k を指標に16または8方向中最大の値をもつ方向を*i*、2番目の値をもつ方向を*j*とし、それぞれの方向角を θ_i 、 θ_j としたとき、次の条件

- (i) *i*、*j*の方向が隣接していること
- (ii) 式(12)により決定される方向 α が θ_i を基準に θ_{i-1} と θ_{i+1} の範囲内にあること

を用いる。これは、解析対象画素を通過した粒子は必ずその近傍画素を通過し、その方向の相関値が最大になるということを前提としたものである。

2.3 ラグタイムの推定

中心対称な輝度分布をもつ物体の運動の速度ベクトルを解析的に導く手法を提案したが、そのためには、各方向のラグタイムは正確なものでなければならない。つまり、式(11)、(12)はラグタイム τ_k 、 v_k が正確であるときに初めて速度ベクトルの厳密な解を与える。しかし、実際には、2.1の解析から得られるラグタイムは、動画のフレーム間隔でサンプリングされた輝度変化の関数から求めたものであり、どうしてもデジタル誤差を含む。特に0.5 pixel/frame (以下、速さの単位はp/fと記す)以上の速い領域では、そのままでは必要な精度のラグタイムを求めることは困難になる。そこで、式(4)で与えられる相互相関関数の幾何平均 $\gamma^{kk'}(\tau)$ の関数形は、真のラグタイムに対応するピーク付近では、図4のように2次曲線で近似できるものと仮定する。これを式に表すと

$$\gamma^{kk'}(\tau) = \gamma_{km} - a(\tau - \tau_{km})^2 \tag{13}$$

となる。ここで γ_{km} は推定される*k*方向の相互相関係数の最大値、また τ_{km} はそのときの推定されるラグタイムである。この仮定を導入することにより上記のデジタル誤差をかなり解消することができる。

式(13)の2次曲線補間によって、より正確なラグタイ

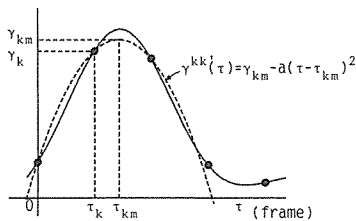


図4 2次曲線補間法による真のラグタイムの推定

Fig. 4 Estimation of true lag-time by a quadratic interpolation method.

ムおよび最大相関値を推定する解析法は、前回の報告⁽¹³⁾でも取り入れていたが、決定した γ_{km} 、 τ_{km} の内、最大相関値 γ_{km} のみを用いて速度ベクトルの方向を決定していた。そこでは、更に γ_{km} の方向(θ)依存性を2次曲線

$$\gamma_{km} = \gamma_{\max} - b(\theta - \theta_{\max})^2 \tag{14}$$

で補間できるものと仮定して、最大の相関値を与える角度 θ_{\max} を求め、近似的にこれを速度ベクトルの方向としていた。図5は、従来の方法と今回提案した解析法を比較しフローチャートとしてまとめたものである。両解析法の特徴などの定量的な議論は、3章の種々のシミュレーション画像に対して今回の解析法を用いた結果の比較・検討により行う。

ところで、実際に式(11)、(12)の厳密解を用いて速度ベクトルを解析する場合、その決定精度が、上で述べたラグタイムの精度はもちろん、最初に仮定した粒子の中心対称性の程度によって大きく左右されることが予想される。このことは、現実の画像を対象とする場合には重要な点であるが、これについても、3.で、種々のシミュレーション画像を取り上げ解析していく中で議論する。

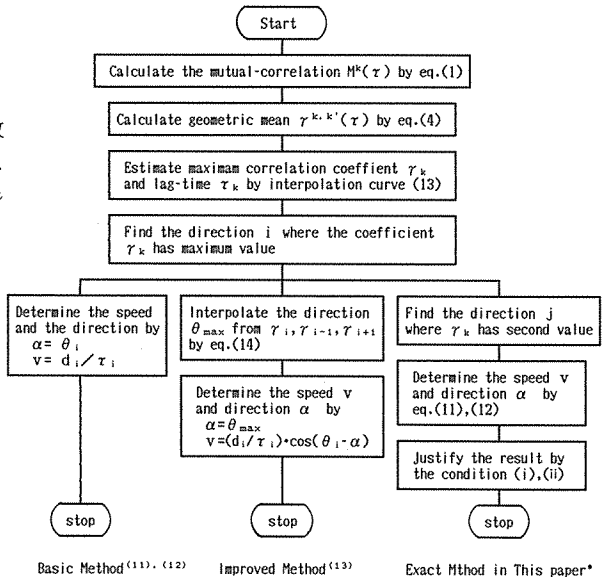


図5 従来法との計算手順の比較

Fig. 5 Comparison of the algorithm of the proposed new method and our old methods.

3. シミュレーションによる検証

ここで提案した速度ベクトルの決定法の有効性を定量的に評価するため、計算機シミュレーションを行った。解析対象の動画は64×64画素を1フレームとして、128フレームの画像よりなり、各画素のグレイレベルは256階調である。運動粒子の空間的な輝度分布の変化はガウス関数的なものとし

$$f(r) = \begin{cases} 220 \exp(-r^2/r_d^2) & (r < 1.5r_d) \\ 0 & (r > 1.5r_d) \end{cases} \quad (15)$$

とした。ここで r は粒子の中心からの距離を画素間距離を単位 (pixel) として表したものである。また、 $r_d = 2\text{pixel}$ とした。

3.1 小数粒子の運動解析例

まず、画面内をそれぞれ異なる速度で動く五つの粒子の運動をシミュレートした動画の解析結果について述べる。このとき、各粒子は交錯したり重なったりすることはなく、各々の粒子の中心対称性は満たされている。各粒子の速度のデータ (速さおよび方向) は表1に示した。このときの解析は図1(b)に示す中心画素と

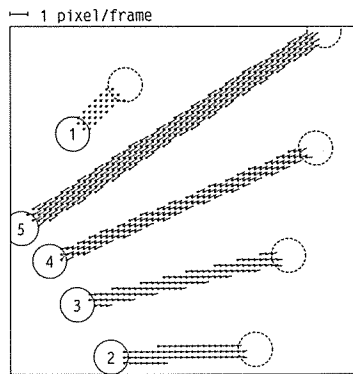


図6 小数粒子の運動に伴う速度ベクトル場(オプティカルフロー)の解析例

Fig. 6 An example of analyzed velocity-field(optical flow) caused by the passage of five particles.

表1 計算機シミュレーションに用いた粒子の速さおよび方向角の値

粒子 NO.	速さ v (pixel/frame)	方向 θ (degree)
1	0.1	43.0
2	0.2	3.0
3	0.3	13.0
4	0.4	23.0
5	0.5	33.0

近傍8画素との輝度時系列間の相互相関解析を用いて行った。

図6に、その結果を示す。求められた速度ベクトルは、小さな黒丸を始点とした直線で示されている。黒丸は解析した画素の位置を示し、そこから伸びた線で速度ベクトルの大きさと方向を示している。速度の絶対値のスケールは図左上に示した。図中の実線で描かれた円は粒子の移動開始点で、点線の円は最終位置である。実線の円内の数字は表1の粒子番号に対応している。移動開始位置および最終位置付近に決定された速度ベクトルの方向の乱れが多少見られるが、その移動軌跡をよく反映している。粒子の周辺が通過した画素が表示されないのは、2.2で述べた条件(i), (ii)が満たされないからである。

図7(a), (b)は、図6に示した速度ベクトル場から求めた角度分布および速さの分布をヒストグラムで示したものである。各粒子に設定した速さおよび角度(表1参照)は各ヒストグラムの上部に矢印で示した。速さおよび角度ともに各粒子に設定した値が独立したピークとして明りょうに分離されている。各ピークと設定値間の偏差はほとんどなく、解析法が有効であることがわかる。なお、粒子の速さが速いほど、通過する画素の数が多くなるので、各々の分布を求める際には、頻度をその画素の速さで規格化して示した。

3.2 従来法⁽¹³⁾との比較

ここで、今回提案したラグタイムからの速度ベクトルの決定法と、従来、我々が提案してきた相互相関係数を式(14)で2次曲線補間する方法とを定量的に比較する。

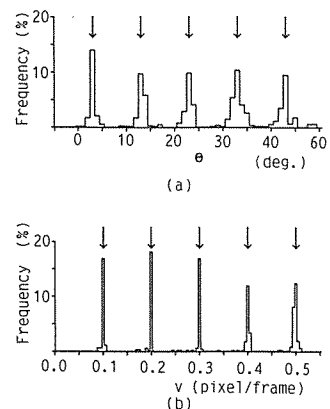


図7 図6の速度ベクトル場の角度分布および速さ分布 (a)角度の分布 (b)速さの分布

Fig. 7 Distribution of the direction (a) and that of the speed (b) calculating from the velocity field shown in Fig. 6.

図8は、それぞれの方法で求めた速度ベクトルの速さの決定精度を比較したものである。シミュレートした動画には5個の粒子が含まれており、角度に依存しない評価を下すために、各々を3~43°の異なる方向に移動させた。横軸は粒子に設定した速さ、縦軸は、求められた各画素の速さをヒストグラムにしたときの中央値と設定値との偏差を示している。図8(a)が従来の方法、(b)が今回提案したラグタイムによる解析精度である。各図ともに、実線は16近傍、点線は8近傍画素を用いた場合で、測定点の上下に伸びた縦棒は、ヒストグラムの半値幅を示している。この半値幅は決定された各画素の速さのパラッキの目安を与える。

従来の方法では、16近傍画素を使えば設定された速さがほぼ忠実に計測可能であるが、8近傍画素による解析では、粒子の速さが速くなるにつれて、真の速さからの偏差およびパラッキが大きくなっている。一方、今回ここで提案したラグタイムから求めた速さは、真の速さをよく反映し、8近傍画素を用いた解析でも0.1から0.8 p/fの速さの範囲でパラッキは半値幅にして±0.005 p/f程度に抑えられている。この精度から考えて、2.2の式(13)で仮定したラグタイムの推定法は有効な推定法であることが裏づけられる。

次に、角度の計測精度を比較したものを図9(a), (b)に示す。解析の原理からも明らかなように、角度に関しては0~45°の範囲でその精度を考察すれば、それ以外

は対称に折り返した結果となることは明らかである。図9(a)は従来の方法を用いたものであり、図9(b)は今回提案したラグタイムによる方法である。速度に依存しない方向決定精度を得るために、画面中には10個の粒子を置き、各々を0.05~0.48 p/fの異なる速さで移動させた。図8と同様に、横軸には設定した角度、縦軸には得られた角度分布のヒストグラムの中央値と設定した真の角度との偏差をとり、縦棒でその半値幅を示している。

従来の方法では、角度の計測精度は16近傍画素を用いても十分な精度を得ることができず、角度によっては最大5°程度の偏差を消すことができなかった。しかし、図9(b)からも明らかなように、今回提案したラグタイムから求めたものは、真の方向に対する偏差もほとんどなく、±1°程度のばらつきで正確に計測が可能となった。

図8, 図9に示した結果から、ここで提案したラグタイムによる速度ベクトルの決定法は、真の速度ベクトルに対し速さの精度±0.005 p/f, 角度の精度±1°程度の十分な精度をもった有効な速度ベクトルの決定法といえる。

3.3 多数の粒子を含む速度ベクトル場の解析

今まで示してきた動画は粒子数が少なく、ある一つの画素を通過する粒子はただ一つだけであった。従っ

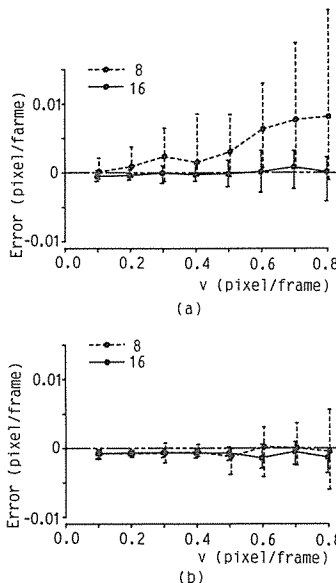


図8 従来法との速さの解析精度の比較
(a)従来法の場合 (b)ここで提案したラグタイムによる場合
Fig. 8 Comparison of the speed determination error between our old method (a) and new one (b).

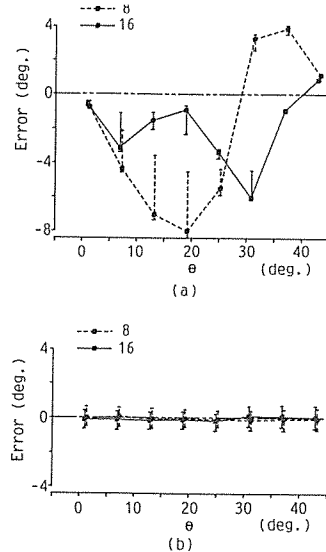


図9 従来法との角度の解析精度の比較
(a)従来法の場合 (b)ここで提案したラグタイムによる場合
Fig. 9 Comparison of the direction determination error between our old method (a) and new one (b).

て、各画素の輝度の時間変化の波形は単調なものであり、相互相関から求める相関係数 γ_{km} 、ラグタイム τ_{km} は、共に比較的誤差も少なく、設定した通りの速度ベクトルが得られた。しかし、現実の動画像では、一つの画素上を複数の粒子が通過することがほとんどであろう。このような、現実の動画像処理への応用の可能性を調べる意味で、50個の粒子が並進運動を行うような動画像のシミュレーションを行った。これは、流体の流れをトレーサ粒子を混入し可視化した場合を想定している。設定した各粒子の速さは0.5 p/f 方向角は25度で、粒子の初期座標は、乱数により決定した。粒子の重なり程度、空間的な分布の状態をみるために図10に動画像の一例を示した。

この動画像がつくる速度ベクトル場を、今回提案した解析法(近傍8画素の相関を用いた)によって解析した結果を図11に示した。この動画像の解析の際には、周辺2画素を除いた60×60画素のうち振幅20以上の輝度変化を示す3595画素を対象にした。図11には、その内の2.2に示した条件(i)~(iii)を満たした3017画素

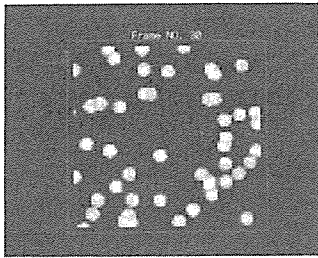


図10 計算機シミュレーションによる並進運動粒子群の動画像の一例
Fig. 10 An example of the simulated image of the parallel motion of fifty particles.

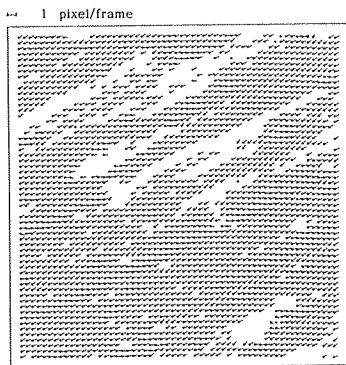


図11 多数粒子の運動による速度ベクトル場の解析例
Fig. 11 An example of the analyzed velocity field caused by parallel motion of fifty particles.

の速度ベクトルが示されている。表示された各画素のベクトルは、一部、乱れた部分も見えるが、ほぼ、設定された方向および絶対値を示している。

図11の速度ベクトル場を、角度および速さの分布として図12(a), (b)に示した。各分布の中央値および半値幅は、比較のために同じ動画像を従来法で解析した場合のそれと共に表2に整理した。従来法が、図9に示した傾向と同様、得られた角度分布の中央値が、設定した粒子の真の移動方向に対し、5.2度程度の偏差を示すのに対し、今回提案した方法では、その偏差は見られない。ヒストグラムの半値幅は約6度と小数粒子の場合に比べ大きな値を示しているが、これは、粒子の重なりなどのため、中心対称な輝度分布という仮定が成立しなくなったことや、複数の粒子の異なった部分が通過したために正確なラグタイムが式(3)で推定できなくなったことが原因と考えられる。しかし、ここで示した解析法では、速度ベクトル決定に当って、ラグタイム τ_{km} の値しか用いておらず、もう一方の計測量 γ_{km} は、2.1あるいは2.3で示したように、大まかな方向の

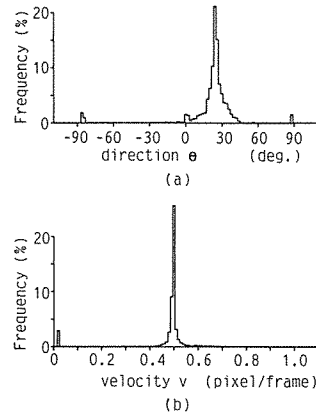


図12 図11の速度ベクトル場の角度分布(a)および速さの分布(b)
Fig. 12 Distributions of the direction (a) and that of the speed (b) calculating from the velocity field shown in Fig. 11.

表2 並進運動粒子がつくる速度ベクトル場の速さおよび角度分布の中央値と半値幅

設定値 速さ: 0.5 (p/f) 方向: 25 (deg.)	速さの分布の 中央値/半値幅 v (p/f)	角度の分布の 中央値/半値幅 θ (deg.)
ラグ・タイムによる方法 (新)	0.498 / 0.008	24.5 / 6.2
相関係数の2次元関数補間法(旧)	0.517 / 0.034	19.8 / 1.4

選択の指標としてのみしか利用していない。方向決定のばらつきを抑える手段としては、この γ_{km} の値そのものを、先に示した条件(ii)の角度の範囲の限定などに積極的に利用したり、 γ_{km} を方向推定に利用した従来法を更に改良し、今回提案した方法と併用することなどが考えられる。このような対応は今後の課題である。

4. む す び

我々は、画素を通過する粒子による輝度の時系列変化から近傍画素との相互相関解析によりその画素の速度ベクトルを推定する方法を提案してきた。しかし、これまで提案した方法では、その方向を決定する手段はあくまで近似的なものであった。本報告では、粒子の輝度分布に中心対称性を仮定して、相互相関解析により得られるラグタイムを基に、画素ベクトルの速さと方向を解析的に決定する方法を示し、計算機シミュレーションにより速さ・角度の決定ともに、これまでの方より以上の精度を確認し、その有効性を確かめることができた。また、この方法は、いままで提案してきた方法では十分な測定精度を得ることができなかった最隣接 8 近傍画素との相互相関解析でも十分な解析精度が得られ、これまでの近傍 16 画素との相互相関解析法で課題であった計算時間の短縮にも有効な手段として期待できる。

今後は、ここで提案した方法の実際の動画像への応用について、更に検討を加えて行く予定である。

謝辞 本研究を進めるに当たり、解析手法などの討論に参加して頂いた山口大学工学部栗原靖氏、徳山高専百田正広氏に感謝致します。

文 献

- (1) K. Imaichi and K. Ohomi : "Numerical processing of flow-visualization picture measurement of two-dimensional vortex flow", *J. Fluid. Mech.*, **129**, pp. 283-311 (April 1983).
- (2) 片平, 仁田, 田中, 本郷, 香川 : "固体トレーサ法による人工心臓内の流れの定量解析", *ME 誌*, **24**, 1, pp. 225-231 (昭 61-02).
- (3) 落合, 三池, 橋本, 蛭名 : "画素時系列の相関解析を利用した動画像処理による微粒子集団の速度分布計測", *信学論(D)*, **J69-D**, 10, pp. 1534-1537 (昭 61-10).
- (4) M. Yachida : "Determining velocity maps by spatio-temporal neighbourhoods from image sequence", *Comput. Vision Graphics & Image Process.*, **21**, 2, pp. 262-279 (Feb. 1983).
- (5) G. Adiv : "Determining three-dimensional motion and structure from optical flow generate by several moving object", *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*,

PAM-7, 4, pp. 384-401 (July 1985).

- (6) A. M. Waxman and S. S. Sinha : "Dynamic stereo : passive ranging to moving objects from relative image flow", *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, *PAMI-8*, 4, pp. 406-412 (July 1986).
- (7) J. M. Prager and M. A. Arbib : "Computing the optical flow : The match algorithm and prediction", *Comput. Vision Graphics Image Process.*, **24**, 3, pp. 271-304 (Dec. 1983).
- (8) P. Anandan and R. weiss : "Introducing a smoothness constraint in a matching approach", *COINS Technical Report*, 85-38 (University of Massachusetts at Amherst), pp. 1-26 (Dec. 1985).
- (9) B. K. P. Horn and B. G. Schunck : "Determining optical flow", *Artificial Intell.*, **17**, 1-3, pp. 185-203 (Aug. 1981).
- (10) H. H. Nagel and W. Enkelmann : "An investigation of smoothness constrains for the estimation of displacement vector fields from image sequences", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machin. Intell.*, *PAMI-8*, 5, pp. 565-539 (Sept. 1986).
- (11) H. Miike, Y. Kurihara, K. Koga and H. Hashimoto : "Velocity-field measurement of a vortex by dynamic image processing", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**, 5, pp. L409-L412 (April 1986).
- (12) H. Miike, Y. Kurihara, H. Hashimoto and K. Koga : "Velocity-field measurement by pixel-based temporal mutual-correlation analysis of dynamic image", *Trans. IECE*, **E69**, 8, pp. 877-882 (Aug. 1986).
- (13) 三池, 栗原, 古賀 : "画素時系列の相互相関解析を用いた動画像処理による速度ベクトル場計測法の改良", *信学論(D)*, **J70-D**, 4, pp. 836-839 (昭 62-04).

(昭和 62 年 2 月 12 日受付)



古賀 和利

昭 49 山口大・工・電気卒。昭 51 同大学院修士課程了。同年同大助手。昭 54 同大工業短期大学部講師。現在に至る。その間、昭 53 東北大学電子工学科に内地留学。生体情報工学、画像処理などの研究に従事。日本 ME 学会会員。



三池 秀敏

昭 46 九大・工・電子卒。昭 51 同大学院博士課程電子工学専攻単位取得退学。同年山口大・工・助手。現在、同助教授。画像計測、光散乱計測に関する研究に従事。工博、電気学会、日本 ME 学会、日本物理学会各会員。