

デジタル動画像処理による空間フィルタ速度計測法

准 員 山本 英明[†] 正 員 百田 正広^{††}
 正 員 古賀 和利^{††} 正 員 三池 秀敏[†]

Spatial Filtering Velocimetry by Digital Image Sequence
 Processing

Hideaki YAMAMOTO[†], Associate Member, Masahiro MOMOTA^{††}, Kazutoshi KOGA^{††}
 and Hidetoshi MIIKE[†], Members

あらかし 空間フィルタ法に基づくデジタル動画像処理によるフレキシブルな高精度速度解析法を提案する。動画像の連続入力時において、画像の投影分布(各フレームの画像を一定方向に積算し、投影画像を得る)を並列的かつリアルタイムで行うことにより、ビデオデータからの長時間連続計測を可能にした。また、正負の値をとる理想的な正弦波空間フィルタの実現や、粒子速度に応じた最適な波長および移動速度をもつ空間フィルタの選択により、ダイナミックレンジの広い高精度自動速度解析を実現した。現実の可視化された流れのシーン(非線形化学反応に伴う振動流)に対し、この手法を適用し、1秒ごとの流れの主速度の時間変化(18分)を解析し有効性を確認した。空間フィルタを重畳した信号のスペクトル解析には最大エントロピー法(MEM)を用い、短い時系列データからの主スペクトル位置の正確な推定を可能にした。

キーワード デジタル動画像処理、空間フィルタ法、投影画像、最大エントロピー法(MEM)

1. ま え が き

局所的な速度を非接触で解析する方法としては、差動型レーザドップラ法^{(1),(2)}や空間フィルタ法^{(3),(4)}が知られている。いずれの手法も基本的には同一原理に基づくものと解釈され⁽⁵⁾、小領域に格子縞を作りその中を粒子が通過するときの光強度信号の周波数スペクトルを解析することにより速度の情報を得ている。こうした計測法では、空間フィルタを光学的あるいはハード的に実現することで速度計測のリアルタイム処理を可能にしている。しかし、用いられる空間フィルタは必ずしも理想的なものとは言えず、そのフィルタの形状から余分な高調波成分やペダスタル(低周波)成分が周波数スペクトルに混入する等、高精度の速度計測実現

の障害となっている。もちろん、その対策としては様々な試みが行われてきている^{(2),(3),(6)}。

近年、マイクロエレクトロニクスの発達を背景にビデオ信号処理による2次元速度計測の試みが行われている。CCDカメラ等で画像を取り込み、マイクロプロセッサ等でプログラマ的に処理をするこの手法は幅広い柔軟性と測定の高精度化の可能性をもっている。岡、三橋、山崎は、イメージセンサと電子回路で構成されたビデオ信号処理システムを用いて、リアルタイム処理可能な柔軟性を有する電子空間フィルタを提案した^{(7),(8)}。この中で彼らは、測定対象に応じたレチクルピッチの自動最適化法や、正負値をとる空間フィルタを用いた信頼性の高い速度計測法を提案している。一方我々も独自に、ビデオテープに記録された動画像データからの高精度速度計測を目標として、空間フィルタ法を基礎とした、動画像処理による速度計測法を提案してきた^{(5),(9)}。この手法は、従来リアルタイム処理のためハードウェアによりアナログ的に実現されていた空間フィルタ速度計測法をほとんどソフトウェア処理に置き換え、柔軟性と高信頼性に富む速度計測法として

[†] 山口大学工学部電気電子工学科, 宇部市

^{††} 山口大学工学部知能情報システム工学科, 宇部市
 Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube-shi, 755
 Japan

^{†††} 徳山工業高等専門学校情報電子工学科, 徳山市
 Tokuyama National College of Technology, Tokuyama-shi, 745
 Japan

確立しようとするものである。これにより、ハードでは実現困難である正・負の値をとる理想的な正弦波フィルタが実現できると共に、フィルタの重畳や信号の積算処理をすべてデジタル化することやスペクトル解析への最大エントロピー法の導入により速度の計測精度が大幅に向上することを示した。また、岡らと同様にフィルタの波長や移動速度も任意に選択でき、運動方向の正負の判別が可能なことや計測のダイナミックレンジも広がるなどの利点をもつ。

しかし、従来の我々の提案では動画画像データ(2次元)をそのままの形で入力した後に、空間フィルタの重畳やスペクトル解析を実行していたため、メモリ容量の制限から一度に解析できる時間があまり長くとれないなどの問題点があった。また、測定の精度やダイナミックレンジを最大にする最適なフィルタの波長や移動速度の検討も不十分であった。そこで、本研究では提案してきた手法を基本に、画像入力時に2次元の画像データを1方向(x方向あるいはy方向)に積算し投影分布を求め、1次元画像データに変換圧縮する処理や、背景の輝度レベルを各画素より差し引く等の前処理を画像入力時に並列してリアルタイムで行わせることにより、連続解析時間の大幅な拡大を図っている。また、自動計測にあたり重要となる最適な空間フィルタの波長や移動速度の決定方法の検討を行い、これをもとに粒子の速度に応じて空間フィルタの波長や移動速度をアダプティブに変化させ、解析精度やダイナミックレンジの向上を実現している。

2. 動画画像処理による空間フィルタ法の基本原理

動画画像から速度を求める解析手法は原理的には空間フィルタ法と同様であるが、従来ハード的、アナログ的に実現されていた空間フィルタを画像上でソフト的、デジタル的に実現する点が異なる。以下、簡単に解析原理を述べる。

まず、図1(a)のような画像中に作った一定速度 \vec{v}_s で伝搬する正弦波空間フィルタ中を複数個の粒子が一定速度 \vec{v}_0 で運動する動画画像($N \times N$ [pixel], L [frame])を考える(以下、[pixel]は[p], [frame]は[f]と略す)。ここで、正弦波空間フィルタの波数ベクトル \vec{K} を次の様に定義する。正弦波空間フィルタの波長 λ 、フィルタの並進速度を \vec{v}_s としたとき、 \vec{K} の大きさ $K = |\vec{K}| = 2\pi/\lambda$ とし、 \vec{K} の方向は空間フィルタの並進方向(通常、波面に垂直な方向、 $\vec{K} \parallel \vec{v}_s$)と約束する。図1

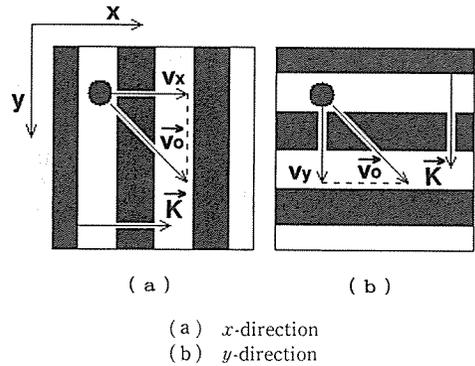


図1 正弦波空間フィルタ中の粒子の運動
Fig. 1 Particle motion in a sinusoidal spatial filter.

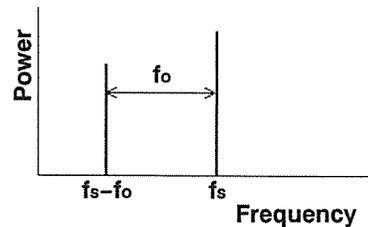


図2 並進速度 v_s で移動する空間フィルタ中を速度 v_0 で運動する物体によるバースト信号のスペクトル
Fig. 2 Spectrum of a burst signal induced by a moving object with velocity v_0 in a sinusoidal spatial filter having translational velocity v_s .

(a)の場合、空間フィルタの移動方向をx軸の正方向とし、運動物体が速度 \vec{v}_0 で運動しているので、観測されるバースト信号の周波数は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} f &= [\vec{K} \cdot (\vec{v}_s - \vec{v}_0)] / 2\pi \\ &= \vec{K} \cdot \vec{v}_s / 2\pi - \vec{K} \cdot \vec{v}_0 / 2\pi \\ &= f_s - f_0 \end{aligned} \quad (1)$$

もし、 $\vec{K} = (K_x, 0)$ とし、画像中に速度の異なる物体、例えば $\vec{v}_0 = (0, 0)$ 、 $\vec{v}_1 = (v_{x1}, 0)$ が存在しているとすれば、 $f = f_s$ と $f = f_s - f_0$ ($f_0 = K_x \cdot v_{x1} / \lambda$)の二つのスペクトルピークがバースト信号に観測される(図2)。このとき、 f_s でのピークは一定速度での空間フィルタの並進に伴う静止物体からのバースト信号であり、 $f_s - f_0$ は速度 \vec{v}_1 で運動する物体の作るバースト信号に対応する。

これより、運動物体の2次元画像上の速度ベクトルを知るには、各々の空間フィルタの波数ベクトルが、 $\vec{K}_x = (K_x, 0)$ 、 $\vec{K}_y = (0, K_y)$ の互いに垂直な空間フィルタを用意すれば、よいことになる。こうしたバースト信号 $A(t)$ は、次のような形で得ることができる。

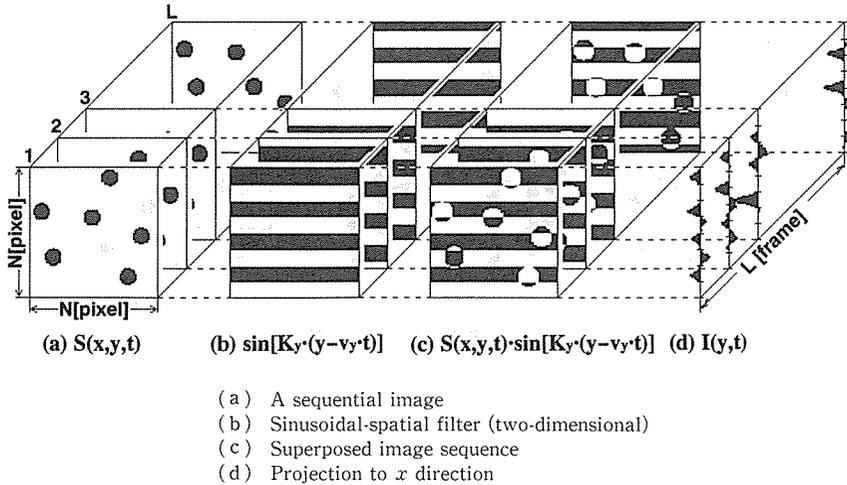


図3 動画処理による空間フィルタ法の解析手順：従来法
 Fig. 3 A procedure of analysis for spatial filtering velocimetry by sequential image processing: previous method.

$$A(t) = \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot h(x, y, t) \quad (2)$$

ここで、 $S(x, y, t)$ は原動画を示し、各画素 (x, y) での輝度の時間変化を示す。また、 $h(x, y, t)$ は移動する空間フィルタを表す画像信号である。空間フィルタの波数ベクトルを \vec{K} 、移動速度を $\vec{v}_s = (v_{sx}, v_{sy})$ とすれば、

$$h(x, y, t) = \sin[\vec{K} \cdot (\vec{r} - \vec{v}_s \cdot t)] \quad (3)$$

と表される。ここで、 \vec{r} は原点 $(0, 0)$ から測った観測画素 (x, y) の位置ベクトルを示す。従って、

$$A(t) = \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot \sin[\vec{K} \cdot (\vec{r} - \vec{v}_s \cdot t)] \quad (4)$$

となる。

ここで、 x 方向の速度成分を求めたい場合空間フィルタとしては、波数ベクトル $\vec{K}_x = (K_x, 0)$ を用い、

$$\begin{aligned} A_x(t) &= \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot \sin[\vec{K}_x \cdot (\vec{r} - \vec{v}_s \cdot t)] \\ &= \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot \sin[K_x \cdot (x - v_{sx} \cdot t)] \quad (5) \end{aligned}$$

とする。一方、速度の y 成分は、空間フィルタ $\vec{K}_y = (0, K_y)$ を用い、

$$\begin{aligned} A_y(t) &= \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot \sin[\vec{K}_y \cdot (\vec{r} - \vec{v}_s \cdot t)] \\ &= \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot \sin[K_y \cdot (y - v_{sy} \cdot t)] \quad (6) \end{aligned}$$

とし、各々のバースト信号 $A_x(t)$ 、 $A_y(t)$ をスペクトル解析することにより運動粒子の速度 \vec{v}_0 が得られる。

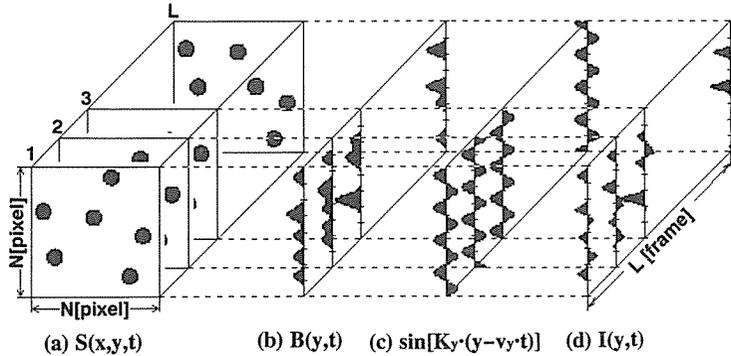
3. 解析法の改良と検討

3.1 2次元画像データの投影1次元化処理による解析時間の拡大

前節で述べたように、動画処理において空間フィルタ法を用いる場合は2次元画像をそのまま取り込み(図3(a))、その2次元画像データをもとに空間フィルタ(図3(b))を重畳して(図3(c))、その輝度信号の総和の時系列(図3(d))に対してスペクトル解析を行なう単純な手法がまず考えられる。その場合、 64×64 [p]の画像では4 [MByte]のメモリを用いた際、取り込める画像枚数は最大1024 [f]で、30 [Hz]でサンプリングした場合連続で取り込めるのは約34秒間であり、長時間の解析を行いたい場合は何度もこの作業を繰り返す必要がある。

しかし、速度解析において、例えば y 方向の速度を解析する場合、 x 方向に輝度分布が積算された投影画像(図4(b))に、1次元の空間フィルタ(図4(c))を重畳(図4(d))しても速度解析は可能である。この事は、式(5)、(6)が各々次のように変形できることより明らかである。

$$\begin{aligned} A_x(t) &= \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot \sin[K_x \cdot (x - v_{sx} \cdot t)] \\ &= \sum_x \left\{ \sum_y S(x, y, t) \right\} \cdot \sin[K_x \cdot (x - v_{sx} \cdot t)] \end{aligned}$$



(a) A sequential image
 (b) Projection of the sequential image to x direction
 (c) Sinusoidal-spatial filter (one-dimensional)
 (d) Superposed sequence of projection image

図4 投影画像を用いる解析手順：新提案
 Fig. 4 A procedure of analysis utilizing projection image: new method.

$$= \sum_x B_x(x, t) \cdot \sin[K_x \cdot (x - v_{sx} \cdot t)] \quad (5')$$

$$A_y(t) = \sum_x \sum_y S(x, y, t) \cdot \sin[k_y \cdot (y - v_{sy} \cdot t)]$$

$$= \sum_y \left\{ \sum_x S(x, y, t) \right\} \cdot \sin[K_y \cdot (y - v_{sy} \cdot t)]$$

$$= \sum_y B_y(y, t) \cdot \sin[K_y \cdot (y - v_{sy} \cdot t)] \quad (6')$$

従って、解析に必要な情報は x, y 方向への投影1次元画像 ($B_x(x, t)$ および $B_y(y, t)$) で十分であり、必ずしも2次元の画像データを必要とはしない。

そこで、今回の解析においては、各画像フレームを2次元データとしてそのまま取り込むのではなく、速度を解析したい方向と垂直な方向に輝度分布の積算を行い(投影画像を作成)、1次元の投影画像データとした後にコンピュータへの取込みを行う。全データの取込み終了後、各1次元データに1次元の正弦波フィルタを重畳し輝度の総和をとる手法を導入している。これにより、もとの画像の復元は不可能となるが、長時間の連続取込みが可能となる。以下、簡単に速度の y 成分の解析手順について述べる。

先と同様に、まず、図4(a)の様に複数個の粒子が運動している動画像 ($N \times N$ [p], L [f]) を考える。

(1) 動画像の各フレームにおいて、輝度分布を1方向 (x 方向) に投影積算して2次元の画像データを1次元の投影画像に変換して画像の取込みを行う(図4(b))。その際、背景の輝度レベルを差し引き、その値

を積算していく(但し、差し引いた値が負であれば、零とする)。すなわち、2次元画像の輝度信号を $S(x, y, t)$ 、1方向に積算された1次元画像データの輝度信号を $B(y, t)$ とすると、

$$B(y, t) = \sum_x \{S(x, y, t) - BG\} \quad (7)$$

ここで、 BG は背景の輝度レベルを表す。 BG の輝度レベルは、あらかじめ解析対象となる動画像の代表画像に対する輝度分布ヒストグラムを作成し、そのヒストグラムのピークの輝度位置より決定する(図6(b)参照)。

(2) 1次元画像データとして取り込んだ動画像データの各フレームに対して、1次元正弦波空間フィルタ(図4(c))を重畳する(図4(d))。変換された信号を $I(y, t)$ とすると、

$$I(y, t) = B(y, t) \cdot \sin\{K_y \cdot (y - v_y \cdot t)\}$$

$$= \sum_x \{S(x, y, t) - BG\} \cdot \sin\{K_y \cdot (y - v_y \cdot t)\} \quad (8)$$

(3) 各フレームで変換された輝度信号の総和を計算し、時系列データ $A(t)$ を得る。すなわち、

$$A(t) = \sum_y I(y, t)$$

$$= \sum_y \left\{ \sum_x \{S(x, y, t) - BG\} \cdot \sin\{K_y \cdot (y - v_y \cdot t)\} \right\} \quad (9)$$

(4) 時系列データ $A(t)$ のスペクトル解析により粒子群の y 成分の速度情報を得る。

以上のように、画像データを1次元に圧縮することにより速度解析に必要な情報が少なくて済み、長時間の連続入力が可能となる。先の例(4 [MByte]のメモリを用い、64×64 [p]の画像を取り込んだ場合)で言えば、16倍の16384 [f] (1画素は1 [Byte]で記憶するが、積算するので1行で2 [Byte]必要とする。更に、 x, y 両方向の画像データが必要である)の画像が連続入力でき、約9分間の連続解析が可能となる。ここでは、4 [Mb]のメモリの場合について例を示したが、大容量のメモリが安価に供給されているので、時間単位のビデオデータの連続自動速度解析も可能となり、リアルタイムの処理ではないものの、オンラインの自動解析法として有用と考えられる。

3.2 解析の高精度化と自動化

速度の自動解析では、最適な空間フィルタの波長と移動速度の決定およびスペクトルにおける主ピーク位置の判別が測定精度に大きく影響する。

3.2.1 空間フィルタの決定

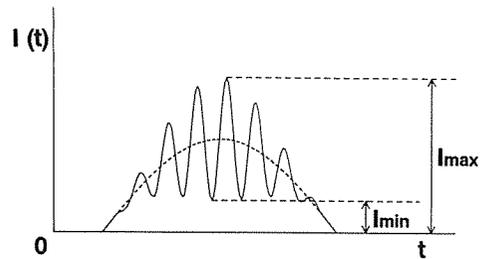
空間フィルタの波長と移動速度を決定する要因は、主に運動粒子の速度と粒径である。まず、粒径について検討する。岡らの報告にあるように^{(7),(8)}、最適な空間フィルタの波長 λ (あるいは、ピッチ p)は対象となる粒子のサイズ、あるいは表面パターンの空間周波数分布に大きく依存する。今、1個の円形粒子がハード的に構成されたある種の空間フィルタ内を通過した場合を想定しよう。透過光輝度の総和の時間変化は、通常図5(a)のように直流分を含んだ正弦波状パースト波形となる。このとき、移動速度に対応する周波数をもつ信号の振幅の指標となる Visibility V は、

$$V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (10)$$

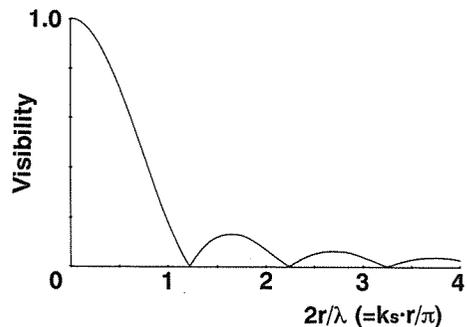
と定義される。この Visibility には波数 ($k_s = 2\pi/\lambda$) 依存性があり、これを $V(k_s)$ とすると次式のように与えられる(図5(b)参照)⁽¹⁰⁾。

$$V(k_s) \propto |2J_1(k_s r) / k_s r| \quad (11)$$

ここで、 J_1 は第一種の円柱ベッセル関数、 r は粒子半径を示す。これは、粒径 $2r$ の1個の粒子が一定速度で運動する画像に波数 k_s の理想的な正弦波空間フィルタを重畳し、積算して得られる時系列データのパワースペクトルの最大値の波数依存性と等価である。図5(b)より、フィルタの波長が粒径と比較して小さくなるとスペクトルが小さくなるのがわかる。特に、波長の定数倍がおおむね粒径と一致する(最初に極小となる時は、 $2r/\lambda \approx 1.23$)ときはスペクトルパワーが極小となる。実際の画像においては、多数の粒子が存在し粒径



(a)



(b)

- (a) Definition of visibility (see Eq. (10))
- (b) Wave number dependence of visibility

図5 Visibility $V(k_s)$
Fig. 5 Visibility $V(k_s)$.

も均一であることは少なく、図のように特定の波数でスペクトルが極端に小さくなることはないが、波数の増加と共にスペクトルが減少していくことは確かである。つまり、信号成分を大きくし雑音に強くするためには、粒径より小さい波長のフィルタを掛けることはできるだけ避けた方がよいことになる。すなわち、

$$\lambda > 2r [p] \quad (12)$$

を満足する波長の空間フィルタを選択する必要がある。しかし、波長の増加に伴い解析精度が低下していくことを忘れてはいけない。従って、上式は λ の下限を与えている。

上述のように画像データ(粒径、雑音)より使用可能なフィルタの波長の範囲が決まると、次にその範囲内で粒子の速度に適したフィルタの決定を行い、速度解析を行っていくことになる。解析方法としては、主として2通りの方法が考えられる。第1の方法は、フィルタの波長に対する移動速度の比を固定して、粒子の速度に応じてフィルタの波長を変えていく方法であり(波長の増加に伴いダイナミックレンジは広がり、解析

精度は低下), 従来のハード的な空間フィルタ法では不可能な方法である。第2の方法は, フィルタの波長を固定し(すなわち, 解析精度は固定), 粒子の速度に応じてフィルタの移動速度を変えていく方法である。

両方法とも, 時刻 t を基点として逐次的に解析を行っていく。時刻 t の速度を計算する場合は, 時刻 $t-1$ の速度解析結果をもとにフィルタの決定を行い解析を行う。 $t=0$ のときは, 粒子の速度が零であると仮定して計算を行う。第1の解析手法におけるフィルタの決定は具体的には, 以下の条件に従って行う。

① フィルタの波長 λ の整数倍 n が画像サイズ N [p] になるように設定する(背景の平均輝度レベルの影響を少なくするため)。

$$n\lambda = N \text{ [p]} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$

② 解析速度の正負のダイナミックレンジを等しくとるために, フィルタの移動速度 v_s を次式のように設定する。

$$v_s = \lambda/4 \text{ [p/f]} \quad (14)$$

③ フィルタの移動速度 v_s は対象となる粒子の速度 v_0 に応じて次のように設定する。

$$v_s = \lambda/4 \geq \gamma |v_0| \text{ [p/f]} \quad (15)$$

但し, γ は速度の急変に対応できるための安全係数で, 通常 $\gamma=1.2\sim 2.0$ に選ぶ(後述する解析例では, $\gamma=1.5$ としている)。

一方, 第2の解析手法におけるフィルタの決定は, 以下の条件に従って行う。

① 画像データに含まれるノイズの大きさを考慮し, 解析結果にノイズの影響が現れにくい適当な波長 λ をもつフィルタを選択する。但し, 式(13)の条件を満たしているものとする(この解析においては, フィルタの波長は一定である)。

② 粒子の速度 v が解析可能であるように, フィルタの移動速度 v_s を設定する。時刻 $t-1$ の解析結果を v_0 とすると, 次式を満足するようにする。

$$|v_0 + v_s| = \lambda/4 \text{ [p/f]} \quad (16)$$

両解析方法を比較すると, 第1の手法では常にフィルタの波長 λ と移動速度 v_s の比率が一定であるため(式(14)参照), フィルタの波長の増加に伴いダイナミックレンジは広がっていき, 同時に解析精度は低下していく。これに対し, 第2の手法ではフィルタの波長が一定であるため, ダイナミックレンジは常に一定であり, 解析精度の変化はなく, 波長を短くとれば高精度の解析が可能となる。しかしながら, 第2の手法では, 解析精度を高めるためにダイナミックレンジはあ

まり広くとらないことが一般的には多く, ノイズによりある時点の解析結果が誤ったものとなると, 次の時点以降, 真の速度がダイナミックレンジより外れる可能性が大きい。つまり, 第2の手法は, 解析精度は常に高くできるが, ノイズに弱い解析法であり, 観測時間内での速度の変動が大きな現象に対してはあまり適していないと言える。一方, 第1の手法では, 正負のダイナミックレンジが常に等しく, 波長の増加に伴いダイナミックレンジが広がるため, 真の速度がダイナミックレンジより外れることはないと考えられる。そこで今回の解析においては, 実際の物理現象の計測を念頭におき, 解析精度の良さより雑音への強さを考慮した第1の解析手法を使用した。もし, 更に高精度の解析結果を得たい場合には, 第1の手法で解析を行った後, その解析結果を利用して, 第2の手法により再度解析を行えばよい。

3.2.2 主ピーク位置の判別

現実の画像においてはノイズも多く, スペクトルに複数個のピークが現れることは珍しくはない。また, 真のピークが最大のパワーをもつとは限らない。そこで, 真の速度に対応するピークを検出する必要がある。今回, 実際に解析を行った動画画像が流体現象であることから, 以下に示すいくつかの仮定を設定して真の速度に対応するピークを検出することにした。以下に真のピークの検出の方法を示す。

① 解析画像が流体現象であることより速度の急変は少ないものとし, 基本的には一つ前の時刻の計算結果 v_0 [p/f] を中心とした一定領域内 ($v_0 \pm 0.5$ あるいは $v_0 \pm 0.75$ [p/f]) よりピーク周波数を決定する。

② 上の領域内のピークが小さい場合(後述する解析例では, 最大ピーク値の40%未満としている)には領域外よりピークを選ぶが, ノイズによる異常値であるとも考えられるので, 先に次の時刻の計算を行う。再び領域外に真のピークがあるとわかれば, 一つ前の時刻の結果は正しいものとする。領域内であれば, 一つ前の時刻の速度は二つ前の結果と今回の結果の平均値とする。

また, 高精度の解析のため, 再度, 上述の第2の解析手法で解析を実行するとき用いるピークの検出方法は, 上述の①のみを使用し, 1度目の解析結果を中心とする領域よりピークを選択する。

3.3 背景輝度レベルの影響

図6(b)に現実の動画画像中のある時刻における画像の輝度分布をヒストグラムに示している。これより, 画

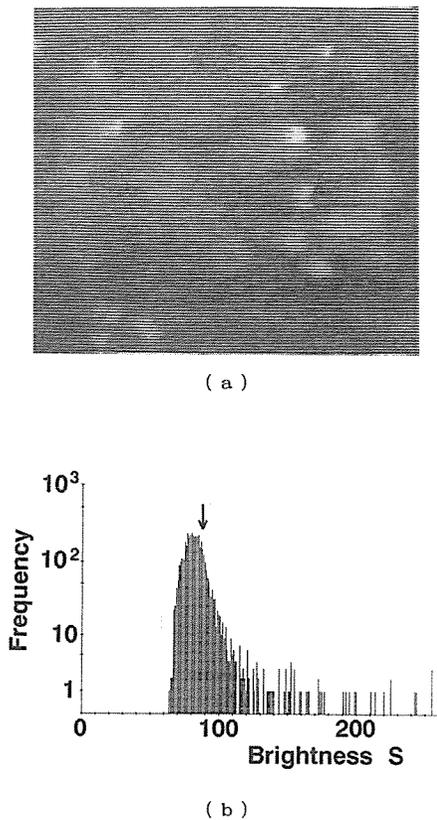


図6 解析した動画画像からのスナップショット(a)と、その輝度分布ヒストグラム(b)
 Fig. 6 A snapshot from analyzed image sequence (a), and its frequency histogram of brightness (b).

像中の背景の輝度レベル(ピークとなっている輝度レベル付近)がかなり高くなっている。このように現実の画像においては背景は必ずしも零という値になるとは限らず、ある一定のレベルの値をとることが一般的である。従って、このままの画像を用いて解析を行った場合、特に周波数偏移法の考えに従い、空間フィルタを一定速度で移動させた場合、得られる時系列データのパワースペクトルにはこの静止している背景の信号成分が多量に含まれることになる。すなわち、パワースペクトルにおいて、フィルタの移動速度 v_s に相当する偏移周波数 f_s のピークのみが大幅に強調されて現れてしまい、速度の解析精度に大きな影響を与える。特に、最大エントロピー法(MEM)等の非線形スペクトル推定法を用いた場合、その影響は大きい。ここでは、一定の輝度レベル(背景の輝度レベルはヒストグラムのピーク値付近であると考えられるのでピーク値より少し高い値(最大輝度値の約10%)に設定: 矢印)を各画素よ

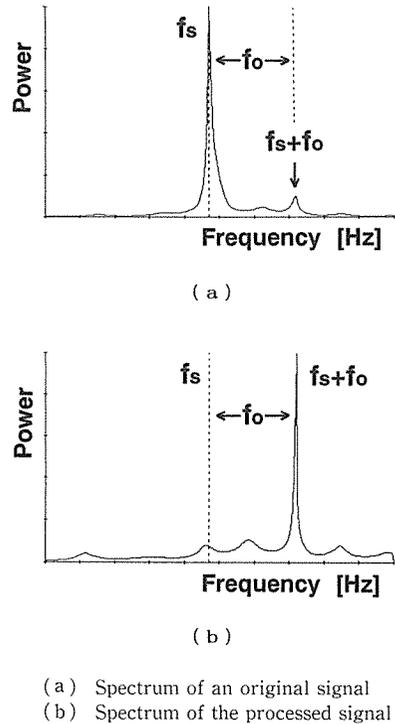


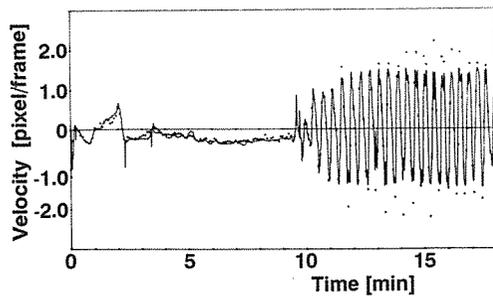
図7 背景輝度レベルのパワースペクトル(MEMによる)への影響
 Fig. 7 Influence of back-ground brightness level to analyzed power spectrum (by MEM).

り差し引くという処理(但し、差し引いた値が負であれば零とする)を行った場合と行なわない場合とを比較する。対象とした動画画像は、画像全体に散らばった粒子がほぼ一定速度で運動するシーンである(図6(a))。

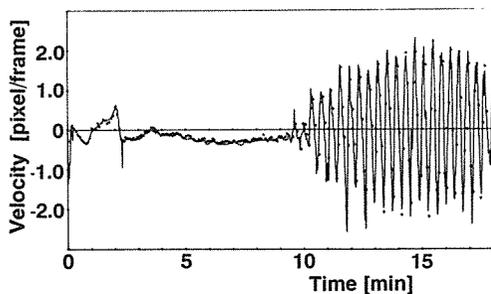
図7(a)は背景の処理を行わなかった場合の信号 $A(t)$ のMEMスペクトル(次数 $M=20$, データ数 $N=60$)であるが、フィルタの移動速度の周波数 f_s が強調され、実際の粒子速度を示すスペクトルピーク(矢印)は抑えられている。このため、粒子群の正しい速度の情報を得るのは困難である。これに対し、背景処理を行った図7(b)では f_s におけるスペクトルが大幅に抑えられ、粒子群の代表速度を示すスペクトルが先鋭に現れ、正しい速度の情報を与えている。以上より、背景処理によっても解析精度が改善されることがわかる。

4. 画像データ解析例

提案した速度計測法を実際の物理現象の解析に適用した。解析した現象は、Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応に伴う振動的流体現象である。BZ 反応とは、非平衡状態において振動的化学反応を示す系として有名で



(a)



(b)

- (a) Result of analysis utilizing a fixed spatial filter ($\lambda=8$ [p], $v_s=2$ [p/f])
 (b) Result of analysis utilizing an adaptive spatial filter

図8 解析例：“BZ反応に伴う流体现象の速度計測”⁽¹²⁾

Fig. 8 Example of analysis: Velocity measurement of oscillatory hydrodynamic flow observed in the BZ-reaction⁽¹²⁾.

あり、酸性溶液中において酸化・還元反応が周期的に繰り返す^{(11),(12)}。特に、非攪拌リアクターにおいて、触媒として $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ を用いることで反応を可視化させると、還元状態の赤色溶液中を酸化状態の青色の化学反応波⁽¹²⁾が伝搬していくのが観測される。最近、この化学反応波の伝搬に伴い、伝搬する対流や振動的流れが発生することを筆者らは明らかにしてきた^{(13)~(15)}。図8は、この振動的な流体现象を、ポリスチレン球(直径 $\phi=0.48$ [μm])とレーザ光で可視化してとらえた動画像を解析した y 方向速度成分の時間変化の結果である。粒子の速度に応じてフィルタの波長と移動速度を変え(動的最適化)による解析精度の向上を明らかにするため、比較として、フィルタの特性を一定値に固定した場合の解析結果もともに示している。図8(a)は波長 $\lambda=8$ [p]、速度 $v_s=2$ [p/f]の固定フィルタを使用したときの結果である(ダイナミックレンジは、 ± 2 [p/f])。一方図8(b)は、フィルタを粒子の速度に応じて最適化しながら解析した結果である。実線が1秒ごとの

計算結果で、・印がマニュアルによる5秒ごとの計測結果である。図8(a)より、速度の遅い領域ではあまり問題がないものの、速度の速い領域ではダイナミックレンジが追いつかず、正しく解析されていないことが確認できる。一方、図8(b)では、マニュアルによる測定結果と解析結果がどの速度領域においてもほぼ一致しており、良い結果が得られていることが確認できる。解析に用いた動画像入力システム等の詳細は続報にて報告する予定である。

5. むすび

理想的な正弦波空間フィルタを動画像上でソフト的に構成することにより、ベダスタル成分や高調波成分の発生しない正確な速度計測法が実現できる。空間フィルタの波長、移動方向などが自由に変えられるため、粒子のサイズや移動速度に応じた最適な空間フィルタが選択でき、ダイナミックレンジの広い高精度の速度計測が可能となる。更に、各画像フレームの輝度分布を一方に積算する処理(投影分布)を並行してリアルタイムに実行する連続画像取り込みや背景処理により、従来制約されていたデータ長を大幅に増大させることや解析精度を向上させることが可能となり、ビデオデータからの長時間の連続速度解析が実現できた。近年の流体の可視化技術の進歩を考えると、提案した動画像計測法は将来広い分野に適用可能な解析法として期待できる。今回用いた現実の画像に対しては、かなり高い解析精度を得たが、今後、他の現実画像に対しても同等の解析精度が得られるか確認が求められる。また、MEMの精度の向上も今後必要である。

文 献

- (1) Cummins H. Z., Knable N. and Yeh Y.: "Observation of Diffusion Broadening of Rayleigh Scattered Light", *Phys. Rev. Lett.*, **12**, 6, pp. 150-153 (1964).
- (2) Stevenson W. H.: "Laser Doppler Velocimetry: A Status Report", *Proc. IEEE*, **70**, 6, pp. 652-658 (1982).
- (3) Aizu Y. and Asakura T.: "Principles and Development of Spatial Filtering Velocimetry", *Appl. Phys. B*, **43**, pp. 209-224 (1987).
- (4) 小林 彬: "計測用空間フィルタ法の進展", *応用物理*, **52**, 12, pp. 1007-1014 (1983).
- (5) Miike H., Koga K., Momota M. and Hashimoto H.: "Spatial Filtering Velocimetry by Dynamic Image Processing", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, 9, pp. L1431-L1434 (1987).
- (6) 相津佳永, 牛坂 健, 朝倉利光: "差動型格子状空間フィルタ速度計による細管内流速計測", *応用物理*, **52**, 8, pp. 718-724 (1983).

- (7) 三橋 涉, 岡 和彦, 山崎弘郎: “電子的に構成した空間フィルタ”, 計測自動制御学会論文集, **24**, 11, pp. 1111-1117 (1988).
- (8) 岡 和彦, 三橋 涉, 山崎弘郎: “電子的に実現した柔軟性を有する空間フィルタ”, 計測自動制御学会論文誌, **25**, 3, pp. 271-277 (1989).
- (9) 三池秀敏, 古賀和利, 百田正広: “最大エントロピー法による動画像のスペクトル解析”, 信学技報, **IE86**-109 (1987).
- (10) Wang J. C. F. and Tichenor D. A.: “Particle size measurements using an optical variable-frequency-grid technique”, *Appl. Opt.*, **20**, 8, pp. 1367-1373 (1981).
- (11) Zaikin A. N. and Zhabotinsky A. M.: “Concentration Wave Propagation in Two-dimensional Liquid-phase Self-oscillating System”, *Nature*, **225**, 7, pp. 535-537 (1970).
- (12) Zhabotinsky A. M. and Zaikin A. N.: “Autowave Processes in a Distributed Chemical System”, *J. Theor. Biol.*, **40**, pp. 45-61 (1973).
- (13) Miike H., Müller S. C. and Hess B.: “Oscillatory Hydrodynamic Flow Induced by Chemical Waves”, *Chem. Phys. Lett.*, **144**, 5-6, pp. 515-520 (1988).
- (14) Miike H., Müller S. C. and Hess B.: “Oscillatory Deformation of Chemical Waves Induced by Surface Flow”, *Phy. Rev. Lett.*, **61**, 18, pp. 2109-2112 (1988).
- (15) 三池秀敏: “BZ 反応系の画像処理と流体現象”, *Sci. Form*, **3**, pp. 155-184 (1989).
- (平成3年12月9日受付, 4年5月19日再受付)

古賀 和利



日本 ME 学会会員。

昭49山口大・工・電気卒。昭51同大大学院修士課程了。同年同大助手。昭54同大工業短期大学部講師。平1同助教授。平2同大工学部助教授。現在に至る。その間、昭53東北大電子工学科に内地留学。生体情報工学、動画像処理などの研究に従事。工博。日

三池 秀敏



形パターンダイナミクス、流体現象等に関する研究に従事。工博。電気学会、情報処理学会、日本物理学会、形の科学会各会員。

昭46九大・工・電子卒。昭51同大大学院博士課程了。同年山口大・工・電気助手。現在同大電機電子工学科教授。昭62年度および昭63年7月～9月西独マックスプランク研究所(ドルトムント)招聘研究員。動画像処理による物理計測、非平衡化学反応系の非線

山本 英明



平3山口大・工・電気卒。現在、同大大学院博士前期課程在学中。動画像処理による物理計測、非平衡化学反応系の流体現象に関する研究に従事。

百田 正広



昭54山口大・工・電気卒。同年徳山工業高等専門学校情報電子工学科助手。昭62講師。平1助教授。現在に至る。生体情報処理、画像計測に関する研究に従事。情報処理学会、日本 ME 学会各会員。