135 PTVにおける粒子画像抽出のための 粒子マスク法の開発

近畿大学 江藤剛治, 竹原幸生*, 神戸大学 道奥康治, 久野悟志

A Study on Particle Identification in PTV-Particle Mask Correlation Method

Takeharu ETOH*, Kohsei TAKEHARA*, Kohji MICHIOKU** and Satoshi KUNO**

Some algorithms for particle identification in PTV, which are classified in a category "particle mask correlation method", are presented and tested. A typical brightness pattern of a particle image is referred as a particle mask; it is placed on an image plane and correlation coefficient between the particle mask and the image is calculated; the particle mask is scanned on the plane with the calculation of correlation coefficient; the small subareas with high correlation value indicate central areas of particle images.

1. はじめに

3次元PTVのためにいくつかのアルゴリズムが提案されているが、最も基本的な問題点は、1枚の画像から抽出できる粒子数の不足による空間解像力の低下である。例えば現在の技術では、ビデオカメラを用いる場合、最大限抽出できる粒子個数は1,000個のオーダーである。仮に1,000個の粒子が得られたとすると、2次元解析では約30(H)x30(V) (≒ 1,000) の解像力となり、通常の用途に対しては十分な解像力が得られる。3次元ではこれが10x10x10となり、流れの詳細な構造は把握できない。実際には現在の技術では、少し複雑な流れ場に対しては、様々の光学的な問題により、100個程度の粒子しか抽出できないのが普通である。フィルムを使うと解像力の問題は大きく改善されるが、フレームレート(シャッター間隔の逆数)が小さいこと、および複数のカメラの同期が困難であることから、3次元運動の連続計測は困難である。

著者らは、3次元画像計測を目的としてピンボケや粒子の重なり等を含む画像から、アルゴリズムの最初の段階でできる限り多くの粒子を抽出する手法として粒子マスク法を提案している¹⁾。本報告では粒子マスク法のうち、粒子マスク相関法について紹介する。

2. 粒子マスク相関法

粒子マスク相関法には、大別して静止粒子マスク相関法と移動粒子マスク相関法がある。静止粒子マスクはある一時刻の粒子画像を対象とするマスク相関法であり、移動粒子マスク相関法はある時間内の粒子の移動の情報を持つ粒子画像を対象とするマスク相関法である。移動粒子マスク相関法には、長時間露光や多重露光された流跡画像を対象とする軌跡マスク相関法と、連続する数枚の粒子画像から移動を抽出する多時刻粒子マスク相関法がある。今回は静止粒子マスク相関法と多時刻粒子マスク相関法について検討した。

* Kinki University, 3-4-2 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka

** Kobe University, Rokkodaityo, Nada-ku, Kobe

静止粒子マスク相関法および多時刻粒子マスク相関法では静止した粒子マスクの形状を仮定する必要がある。単一粒子画像は中心輝度が大きく、周辺が暗い富士山状の輝度分布を持つ。著者らはこれを2次元正規分布関数で近似している(Fig. 1)。牛島²⁾はこれに2次関数をあてはめている。このような輝度パターンを粒子マスクと呼ぶことにする。2次元正規分布の場合のマスク・パターンは次式で表される。

Fig. 1 Particle mask

$$f(x, y) = a \times \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ここに、 a は中心輝度、 σ は標準偏差(代表粒子サイズの $1/2$)、 (x_0, y_0) は中心座標、 $f(x, y)$ は輝度分布である。

粒子マスク相関法では、あらかじめマスク形状(マスク・パターンとサイズ)を決める。画面上の各ピクセル座標を中心として、マスク・パターンの範囲でマスク・パターンと画面の輝度分布との相関係数を計算する。マスク中心座標を全画面上で走査して、この計算を反復する。全画面上の相関値が求まった後、相関係数をもとに粒子抽出を行う。

3. 静止粒子マスク相関法

3. 1 計算手順

粒子径 σ は予め平均的な粒子径を与え、ピーク値 a は1とする。このとき求めるパラメータは中心座標値 (x_0, y_0) となる。すなわち未知パラメータは2個となる。アルゴリズムの概要は以下のとおりである。

Fig. 1, 式(1)のような粒子マスクを1枚の静止画像上に置き、輝度分布との相関係数を求める。粒子マスクの中心座標をピクセル単位で動かし、全画面上でこの計算を行う。相関係数があるいき値以上の領域(1)と以下の領域(0)に2値化する。 (x, y) 2次元平面上で、 x もしくは y 方向の隣接するピクセルが1であるとき、2次元平面上的連結した領域に属するとみなす。各々の連結領域について、重心座標、等価円半径(面積より)を求め、粒子中心の座標、および粒子径とする。粒子中心の原画像上での輝度を求め、その粒子の中心輝度とする。以後の計算で必要であれば、各連結領域の長軸、短軸等を求めておく。

この手法の特徴は、2値化の前に粒子マスクと原画像との相関係数場を求めるところにある。これにより次のような長所が生じる。

- ① 相対的にいかに薄い粒子画像であっても、輝度パターンが、中央がやや明るく裾が暗くなる山型になっておれば、中心付近の相関係数は1に近い大きな値となる。一方、強いコントラストを持つ明確な粒子像であっても、相関係数は1を超えない。すなわち、明るい粒子や暗い粒子が混在するような場(3次元撮影では多い)でも、粒子の中心位置の相関係数はほぼ1に基準化され、一定の域値により、もれなく抽出できる。
- ② 原画像を直接2値化すると、境界等の線形要素も残る。一方、後述のように線形要素と

粒子マスクの相関係数は最大でも0.7程度となり、適当にいき値を選べば、2値化の時点で自動的に線形要素を消去できる。

一方、以下の問題点がある。

- ①感度が高すぎて、粒子像以外の微弱な凹凸もピックアップする。
- ②非常に近接した2粒子の分解能が、マスク適合法よりは低い。

3. 2 粒子マスク相関法の性能評価

本節では1枚の静止画像の粒子像に対する静止粒子マスク相関法を対象として、粒子抽出性能の評価を行う。項目は(1)マスクサイズ、(2)線形要素の消去、(3)近接する2粒子の分解能の3つである。まず、粒子マスク相関法ではマスクの大きさは仮定した値に固定する。このサイズについて検討する。次に、計算機上で人工的に作成した画像に、この手法を適用する。通常の2値化による粒子抽出においては、境界などの線形要素も同時に抽出するので、これらを2値化後消し去ると境界付近の粒子も同時に消えてしまうなどの大きな問題点がある。よって人工的に作成した線形要素に、粒子マスク相関法をあてはめ、相関係数が最大どの程度になるか検討する。同じく人工画像を用いて、近接して中心輝度の異なる2粒子があった場合、この2個を分離できる限界を明らかにする。

粒子マスクの幅を $\sigma_m=3$ ピクセルに固定し、粒子画像の幅を σ_p を0.5~15.0 ($\sigma_p/\sigma_m = 0.167 \sim 5.0$)の範囲で変化させた。相関係数と σ_p/σ_m の関係をFig.2に示す。粒子マスクのサイズは一定としてよい。その1/3~8倍のサイズの粒子画像はもれなく抽出できる。

Fig.3には、粒子マスクのサイズを代表直径の1/2、すなわち $\sigma_m=3$ ピクセルに固定し、堤防状線形要素の半幅(σ_l)を1~10ピクセルの範囲で変化させたときの相関係数を示す。図より、線形要素を自動的に除去するには相関係数0.7をいき値として高相関域を抽出すればよい。

Fig.4は2個の粒子の中心輝度比が1/1, 1/2, 1/4, 1/10, 1/20の場合の限界解像力を計算した結果を示す。図中の○印はいき値0.7で2値化処理を行う場合の2つの粒子が分離可能であることを示しており、●印は分離が不可能な場合を示している。中心輝度比の減少にともない、限界解像力は低下するが、中心間距離 $L/(2\sigma_p) = 1.8$ (粒子直径の1.8倍)までは、輝度に大きな差(中心輝度比が1/10)があっても分離可能である。

Fig.2 Relation between σ_p/σ_m and correlation

Fig.3 Correlation between linear element and particle mask

4. 多時刻粒子マスク相関法

多時刻粒子マスク相関法は、連続する数枚の画像を用いて粒子の位置、輝度、サイズを抽出すると同時に粒子の動く方向、速さも検出するものである。例えば、連続する5枚の画像を用いて多時刻粒子マスク相関法を適用する場合、3枚目の画像中のあるピクセル中心にある検索領域を設定する。この検索領域内で粒子が等速で運動すると仮定して、粒子が移動する方向に各時刻の画像中に粒子マスクを移動させて、5枚の画像で相関を取る。もし、ある粒子が3枚目の画像中で検索領域の中心を通り、仮定した移動方向、速さで移動していれば相関値は高くなる。粒子が移動する方向、速さは検索領域内で走査し、検索領域も3枚目の画像中で移動させて検索する。粒子マスクの設定は静止粒子マスク相関法と同様である。

多時刻粒子マスク相関法の長所は以下の点が挙げられる。

- ①粒子抽出と同時に流速の測定が可能となる。
- ②複数の粒子が画像上で交差するような場合でも、分離が可能である。
- ③時間的にランダムに生じるノイズ画像の除去に非常に有効である。

問題点としては以下の点が挙げられる。

- ①粒子の移動方向、速さの測定精度が悪い。
多時刻粒子マスク適合法を用いれば、より高精度で測定することができる。
- ②4次元空間上で相関係数が分布するため、相関係数をもとに2値化を行った場合、4次元空間中の連結を求める必要がある。

Fig. 5に2個の粒子が交差する人工画像(5枚連続)に対して多時刻粒子マスク法を適用した結果を示す。

[参考文献] 1)江藤他：水工学論文集，第40巻，1996，pp.1051-1058.

2)牛島他：土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，第2部(A)，1995，pp.382-383.

Fig.4 Resolution of particle mask correlation method

a) artificial images

b) a correlation image
 Δx and Δy indicate the movement of particles in images from $t = 3$ to $t = 5$.

Fig.5 Multi-step particle correlation method