第Ⅱ部門

粒子マスク相関法の性能評価

近畿大学理工学部　正　員　江藤剛治
近畿大学理工学部　正　員　竹原幸生
近畿大学大学院　　学生員○白須敏成

1．はじめに

IV(Image Velocimetry，画像速度計測法)は，これまでの計測法に比べ，時々刻々の空間的な流速場を計測することができるという利点を有する。

しかし，現在の画像計測技術では，十分な精度の計測結果を得ることができない。これらの原因として以下のようなものが考えられる。

①ピンボケや粒子の重なりにより，粒子画像から十分な粒子数を抽出できない。
②トレーサー粒子の流れへの追従性。
③画像上での粒子の消失や出現により，粒子追跡性能が低下する。
④撮影速度不足により画像上での粒子移動が大きくなり，追跡が困難となる。

上記のような原因からもわかるように，粒子画像速度計測法の開発に最も必要な技術の１つは，粒子画像から高精度で多数の粒子を抽出することである。

本研究では，PTV(Particle Tracking Velocimetry，粒子追跡速度計測法)のための高精度粒子画像抽出法として粒子マスク相関法を提案した。粒子マスク相関法を，後述の標準画像に適用し，粒子画像の抽出性能を調べた。また，得られた粒子情報に対して，後述のKC法を適用し粒子を追跡した。

2．粒子マスク相関法の概略

本節では，粒子マスク相関法について概略を述べる。以下の説明では，１つの粒子に対する小領域の画像を“粒子画像”とし，粒子画像が多数写っている１枚の画像を“粒子画像面”と呼ぶ。

粒子画像は中心輝度が大きく，周辺が緩やかな勾配を持つ山形の輝度分布を持つことがわかっている。そこで，本研究では粒子マスクを，粒子位置(X_0, Y_0)を中心とした同心円状の輝度分布(２次元ガウス分布)と仮定し，次式で与える。ここで，I(x, y)は(x, y)における輝度値，aはピーク輝度(中心輝度)，σ_mは粒子画像の幅を表す値である。粒子直径は$2\sigma_m$ある。

$$I(x,y)=a\times\exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{\sigma_m^{\,2}}\right\}$$

粒子マスク相関法では，あらかじめ粒子マスクのピーク輝度aとサイズσ_mの２個を仮定し，マスクの中心位置を粒子画像面全面にわたって走査させる。

これにより，粒子マスクと粒子画像面との相関係数を計算する。相関係数は，中心輝度の値には特に影響しないため，粒子マスクの中心輝度はa=1.0に固定した。また，これまでの研究結果により，粒子マスクサイズσ_mは，粒子抽出性能にあまり関係がなく，マスクサイズの約７～８倍の粒子までが抽出可能である。よって，マスクサイズを小さめに固定しておけば，ほとんどの粒子が抽出可能である。

粒子マスク相関法では，得られた相関面に対して，ある閾値で２値化することで粒子画像の抽出を行う。通常の２値化法でよく問題となるのは，水槽の端部や計測器などの線形要素の処理である。相関面から線形要素を自動的に除去し粒子画像のみを抽出するためには，閾値を決めればよい。粒子マスクと線形要素との相関係数は最大でも0.7であり，この0.7を相関面の閾値とすれば線形要素の像は自動的に除去できる。

粒子マスク相関法が，通常の２値化による粒子画像抽出法に比べて有利な点を以下にまとめる。

①輝度の低い粒子画像でも，粒子マスクとの相関値がほぼ1となり，粒子画像抽出が可能となる。
②粒子画像の重なりなどによる近接した粒子の分離が，通常の２値化法よりも高精度で行える。
③水槽端部や計測器などの線状の画像を除去できる。

近接する粒子の分離性能(②)については，以下の結果が得られている。

(イ)２個の近接粒子の中心輝度がほぼ等しいときは，限界分解中心間距離は粒子直径である。
(ロ)近接する２粒子の中心輝度比が1:10でも直径の２倍あれば分離できる。

Takeharu ETOH, Kousei TAKEHARA, Toshinari SHIRASU

3．適用例

(1)標準画像

可視化情報学会「PIVの標準化・実用化研究会」で作成した標準画像を用いた。上記研究会は，これまで提案されている粒子画像速度計測法の標準化・実用化のために，各手法の特性を比較するベンチマークテストのための標準データとして，人工的な粒子画像を作成した。

(2)粒子マスク相関法による抽出例

今回使用した標準画像は，2000個粒子を発生させた画像で，図-1に示す。2000個発生したうち，粒子マスク相関法により，平均929個の粒子が抽出できた。また，比較のために人が粒子を抽出した結果は，875個であった。抽出性能は，ほぼ同程度であり，粒子マスク相関法の方が若干上回った。

図-1中の線で囲んだ領域を拡大して図-2(a)に示す。また，同じ領域の粒子マスク相関法により抽出された２値化画像を図-2(b)に示す。

図-2(a)の原画像中の○印で示した領域の粒子画像は，粒子マスク相関法では抽出できていない。この原因は以下の通りである。

着目している粒子の中心輝度比が0.55の場合，２粒子の分離には粒子直径の1.2倍以上の中心間距離がなければ，粒子マスク相関法による分離はできない。図-2(a)から，２粒子の中心間距離は7pixelであり，大きな粒子の直径約15pixelよりも小さい。よって，この近接２粒子の分離は不可能である。

また，□印で示した粒子マスクで抽出された粒子画像は，原画像の輝度分布を調べると確かに存在する。しかしながら，非常に中心輝度が低い粒子画像であるため，人では認識が困難である。これらについても粒子マスク相関法では正確に抽出している。

また，比較のために，図-2(c)には通常の２値化により得られた画像を示す。粒子画像面の輝度の平均値9.57，標準偏差27.07であり，閾値を9.57および37(平均値＋標準偏差)として２値化を行った。通常の２値化では，粒子画像面中で粒子が集まっている場所では，個々の粒子として分離することができない。また，中心輝度の低い画像は抽出できない。

(3)ＫＣ法による追跡結果の例

粒子マスク相関法により得られた２値化画像より粒子位置と粒子の面積を求め，本研究室が既に提案しているKC法(カルマンフィルターとχ^2検定を用いた自動粒子追跡アルゴリズム)を用いて追跡した。図-3に追跡開始から８ステップ後に得られた流速ベクトル分布を示す。ほぼ完全に対応づけられている。

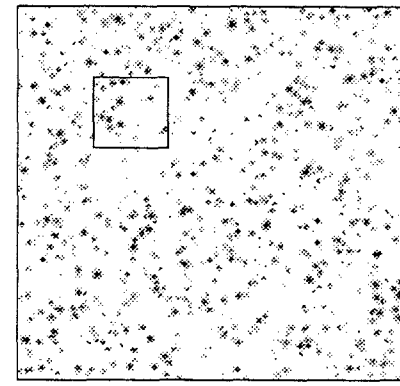
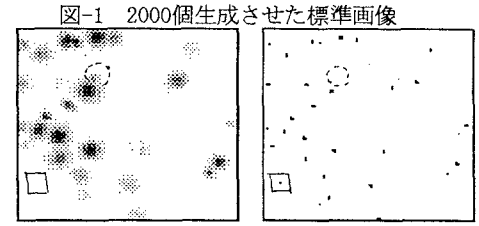
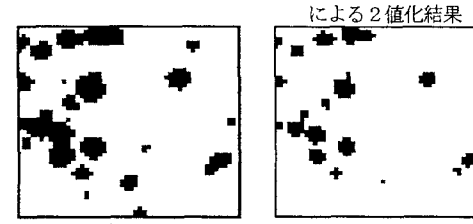


図-1　2000個生成させた標準画像



(a)　原画像　　(b)　マスク相関法による２値化結果



(c) 平均輝度のよる２値化　　(d)　平均＋標準偏差による２値化

図-2 粒子の抽出結果

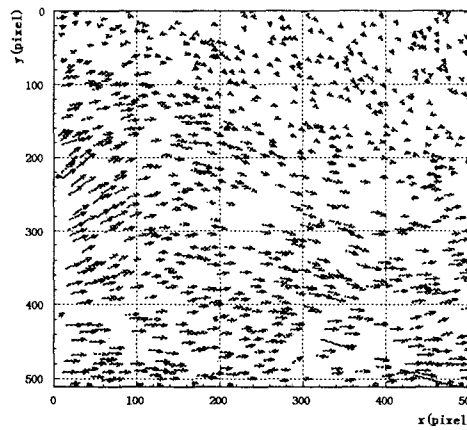


図-3　KC法による流速分布