

KC法を用いた新しいSuper-Resolution PIVの提案

A PROPOSAL OF A NEW SUPER-RESOLUTION PIV BY USING THE KC METHOD

竹原幸生¹・R. J. Adrian²・江藤剛治³

Kohsei TAKEHARA, R. J. ADRIAN and Takeharu ETOH

¹正会員 博(工) 近畿大学講師 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

²Member of ASME, Ph.D., University of Illinois at Urbana-Champaign

³正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

A new super-resolution PIV is proposed. The proposed super-resolution method consists of the standard correlation PIV, the Particle Mask Correlation method (PMC method), and Kalman filter/ χ^2 -test method (KC method). The present super-resolution PIV is referred as to the "super-resolution KC method".

Performance of the super resolution KC method is examined by the Monte-Carlo simulation. The super-resolution KC method is also applied to the measurement of the two kinds of flow fields, of which images are captured by the Double-Pulse/Single-Image method and Single-Pulse/Double-Image method, respectively.

Key Words : Super-Resolution PIV, KC method, Particle Mask Correlation Method

1. はじめに

粒子画像速度計測法(Particle Imaging Velocimetry, PIV)は、流れ中のトレーサー粒子の移動を画像により計測し、速度場を推定する方法である。PIVの特長の1つは、これまでの点計測では困難であった瞬時の空間流速分布を計測できることであり、新たな流れ場の理解が期待される。すでにいくつかの新たな知見も得られ始めている¹⁾。

これまで、種々のPIVアルゴリズムが提案されており、現在、性能向上のため改良が続けられている。PIV技術の開発においては、精度をある程度犠牲にしてリアルタイムで計測できる技術と、解析時間をある程度犠牲にして数値計算結果に匹敵、もしくはそれ以上の精度で計測できる技術の2つの方向性がある。著者らは後者の立場に立ち、開発を行ってきた。今後、より高い時間解像度、空間解像度の計測技術の開発を目的としている。

時間解像度を上げるには、サンプリング周波数を増加させるしかない。これを解決する方法として高速ビデオカメラの開発が必要である²⁾。

本研究では、高空間解像度PIVの開発を目的としている。空間解像度を上げる方法としては、ビデオカメラ自体の解像度を上げるだけでは、PIVの解像度を上げることができない。画像中の多数の粒子を精度良く自動追跡するアルゴリズムが必要となる。

PIVには大きく分けて2つの方法がある。1つの方法は、トレーサー粒子の分布パターンの移動を求める

PMV(Pattern Matching Velocimetry)であり、もう1つは、各トレーサー粒子を追跡するPTV(Particle Tracking Velocimetry)である。PMVの代表的なものは相関法であり、すでに標準的なソフトとして市販化されている。PTVに関しても、いくつかの方法が提案されており、一部市販化されているものもある。

PMVの長所の1つは、2時刻間の画像から流速を求めることができることである。Double-Pulse/Single-Image、もしくはSingle-Pulse/Double-Imageから流速場を求めることができる。PTVでも2時刻間で対応付け可能なアルゴリズムも提案されているが、粒子数が増加すると誤対応の確率が増す。誤対応の確率を減少させるには、同一粒子の対応付けに用いる画像数を増加させるしかない。

一方、PTVの長所として、PMVに比べて空間解像度が高いことが上げられる。PMVは検索領域内にある数個～十数個の粒子の平均移動量を計測しているものであり、個々の粒子の移動を求めたPTVに比べて原理的に解像度が低い。PMVでも、検索領域をオーバーラップすることで、見かけ上、多数のベクトルを得ることができるが、実質的な空間解像度は検索領域のサイズで決まる。

Keaneら³⁾は、それぞれの長所を組み合わせたSuper-Resolution法を提案している。Super-Resolution法では、まずPMVにより粗い格子点上の流速ベクトルを求め、その格子点の速度情報を元に各粒子に速度を内挿し、PTVで2時刻間の同一粒子の同定を行う。これにより、2時刻間で粒子を追跡することができ、解像度の高い流

速場の計測が可能となる。

Keane³⁾の方法では、後述のように、PTVの粒子同定のアルゴリズムに問題がある。本研究では、第1,3著者が提案しているカルマンフィルターと χ^2 検定を用いたPTVアルゴリズム(KC法)⁴⁾および粒子画像抽出のための粒子マスク相関法(PMC法)⁵⁾を用い、Super-Resolution法のPTV部分の改良を行った。また、提案された手法の性能をシミュレーション画像により評価した。さらに、実際の流れ場計測に適用した。適用した画像はDouble-Pulse/Single-Image、およびSingle-Pulse/Double-Imageの2ケース行った。

2. Super-Resolution法のアルゴリズム

まず、Keaneらの提案したSuper-Resolution法の手順を示す。

- ① 2時刻の粒子画像に対して、標準の相関法により、粗な格子点上の流速を求める。
 - ② 第1時刻の画像上から各粒子画像をピックアップし、求めた格子点の流速を元に各粒子の速度を内挿する。
 - ③ 各粒子の内挿された速度から、第2時刻の粒子位置を推定する。
 - ④ 第1時刻の粒子画像周りに粒子サイズと同等の検索画像領域を設定し、その粒子画像に対応する第2時刻の推定された粒子位置の周りにも、同じサイズの検索画像領域を設け、相互相関値を計算する。
 - ⑤ 相互相関値のピーク位置から各粒子の移動を求める。
- 彼らのSuper-Resolution法のPTV部分(手順④)には以下のような問題点がある。

- (1) PTVにおける検索領域が小さいため、相関法で流速を求めるときの検索領域内で、変形が粒子サイズ以上になると計測できない。
- (2) 各粒子の対応付けの検索画像領域内に2つ以上の候補粒子がある場合に、同一粒子を識別できない。

問題点(1)および(2)は、お互いに競合関係にある。問題点(1)でPTVにおける第2時刻の検索画像領域を大きくすれば、大きな流体変形に対しても計測可能となる。しかし、第2時刻の検索画像領域を大きくすればするほど、その領域内に複数の粒子が含まれるようになり、問題点(2)が顕在化してくる。

3. KC法とPMC法によるSuper-Resolution法の改良

カルマンフィルターと χ^2 検定を用いたPTVアルゴリズム(KC法)⁴⁾、および粒子画像抽出のための粒子マスク相関法(PMC法)⁵⁾を用いた新しいSuper-Resolution法を提案する(以降、Super-Resolution KC法と呼ぶ)。

KC法はPTVのためのアルゴリズムとして提案された²⁾。カルマンフィルターにより、ある時刻の粒子情報(粒子位置、速度ベクトル、粒子画像サイズ、粒子画像中心輝

度、等)をもとに、次時刻の粒子情報を予測する。予測された粒子位置周りに検索領域を設け、その中に含まれる実測粒子との対応付けを行う。予測された粒子情報と検索領域内の数個の実測された粒子の情報から、 χ^2 検定を用いて同一粒子の同定を行う。

KC法は、KeaneらのPTV法と違い、はじめから検索領域内に多数の候補粒子が存在した場合を想定している。KC法では、同一粒子の対応付けを予測粒子位置と実測粒子位置のみの関係で判断するのではなく、粒子画像サイズや中心輝度等の粒子情報の予測値と実測値との関係も含めて、客観的に判断する⁶⁾。KC法をSuper-Resolution法のPTV部分に適用することにより、Keaneらの方法で問題となった点を解消することができる。

PMC法は、粒子画像を画像中から効率よく抽出するための方法である。1個の粒子画像のテンプレート(粒子マスクと呼ぶ)を作り、得られた画像と粒子マスクとの相関を取る。画像中の各画素を中心に粒子マスクとの相関値を計算し、相関値画像を作る。計算された相関画像に対して、ある閾値を持って2値化し、粒子画像をピックアップする。ここでは、粒子マスクとして2次元のガウス分布を仮定している。

PMC法の利点を以下に示す⁶⁾。

- (1) 粒子マスクとの相関を取るため、輝度の低い粒子画像でも、ガウス分布に近い形をしていれば、高い相関値を取り、粒子画像をピックアップすることができる。例えば、シート光から少しはずれた暗い粒子画像は、通常輝度値による2値化ではピックアップできないが、PMC法ではピックアップ可能である。
- (2) 粒子画像が近づきすぎると団子状になり、通常2値化では分離が困難になる。粒子マスク相関法では、中心輝度が等しければ、粒子間距離が粒子直径の場合まで分離が可能である。
- (3) 水槽端やセンサーの支持棒などの線形画像は、輝度が高くても粒子マスクとの相関値は低くなるため自動的に消去できる。

以上の2つの方法をSuper-Resolution法のPTV部分に適用する。PMC法についてはそのまま適用が可能であるが、KC法については若干修正が必要である。KC法は時系列データを対象としているので、初期値をある程度粗く与えても、数ステップ追跡すれば、誤対応の確率は低くなる。しかし、2時刻の画像中で対応付けを行った場合、一度、間違っただけで対応付けしてしまえば修正ができない。この問題を解決するため、以下の方法を用いた。

PMC法によりピックアップされた第1時刻の粒子の流速を、格子点流速場データから内挿する。内挿された情報を基に、カルマンフィルターにより第2時刻の粒子情報を推定する。推定された粒子と実測の粒子との対応付けを χ^2 検定により行う。この段階までは通常KC法である。この段階では、誤対応のベクトルも含まれている場合が多い。各々のベクトル位置を中心に周囲の観測

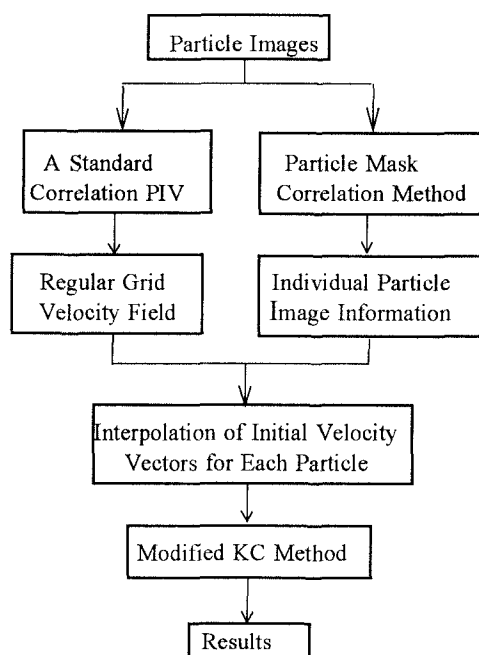


図-1 Super-Resolution KC法のフローチャート

ベクトルから空間平均を求め、対象としている観測ベクトルと置き換える。これにより、誤対応ベクトルの影響を小さくする。その後、KC法を再度適用し、対応付けを行う。対応付けベクトル数が最大になるまで繰り返す。

Super-Resolution KC法の手順を以下に示す。また、図-1にフローチャートを示す。

- ① 2時刻の画像より、標準相関法を用いて粗な格子点上の流速ベクトルを求める。
- ② PMC法により画像から粒子画像をピックアップする。
- ③ ピックアップされた粒子の流速を、①で求めた格子点上の流速ベクトルから内挿する。
- ④ 内挿された情報を元に、第1時刻と第2時刻間の同一粒子の対応付けをKC法により行う。
- ⑤ 対応付いた各観測ベクトルに対して、それぞれのベクトル位置を中心に、観測ベクトルの空間平均を取る。その空間平均ベクトルを観測ベクトルと置き換える。
- ⑥ 再度、KC法による同一粒子の対応付け④を行う。
- ⑦ 上記④、⑤、⑥の手順を対応付け個数が最大になるまで繰り返す。

PMVにおける誤対応ベクトルの除去には統計量を用いた方法やニューラルネットワークを用いた方法等が提案され、実用化されている。ここでは統計的手法を用いた誤ベクトル除去法を用いた。

4. シミュレーション画像による性能評価

Super-Resolution KC法の性能を評価するため、Keane²⁾が用いたモンテカルロ・シミュレーション法による評価と同様な評価を行った。5mm(縦)×5mm(横)×3mm(奥)の領域に粒子密度 N_i (=検索領域内の粒子個数)

で粒子を生成させた。粒子の位置はランダムに決定された。シート光の厚さを1mmとし、トップハットな強度分布を仮定し、奥行き方向中央部に照射した場合を考えた。粒子サイズを画像上で直径8pixelと固定して作成した。画像サイズは1280×1280pixelとした。

2時刻間の粒子画像の移動は並進運動ばかりでなく、乱れのモデルとして変動成分を新たに加え、変動成分の大きさ、サイズを変えて追跡精度を評価した。移動量は次式で与えられた。

$$\Delta x = \Delta x_0 + a \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right)$$

$$\Delta y = \Delta y_0 + a \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right)$$

$$\Delta l (= \sqrt{\Delta x_0^2 + \Delta y_0^2})$$

今回は、相関法の検索領域を256×256pixelとし、2時刻間の粒子移動距離を25.6pixelとした。また、変動成分の振幅 a については0, 0.1 Δl , 0.2 Δl , 0.3 Δl の4ケース行った。振幅 $a=0$ の場合のみ、移動距離 $d=25.6$, 51.2, 76.8pixelと変化させた。また、変動成分の波長 λ については、検索領域サイズ256pixel(=d)の1/2, 1, 2, 4倍の4ケース変化させた。

図-2および図-4は、縦軸に計測されたベクトル数に対する正しく計測されたベクトル数の比(Probability of Success, 正対応率)、横軸に粒子画像密度(Image Density)を取り、結果をプロットしたものである。得られた結果を以下に示す。

- (1) 変動成分がない場合、全ての粒子画像密度、および移動距離に対してほぼ1に近い値となり、計測されたベクトルは全て正しく計測されている。Keaneらの結果のように粒子密度による低下は見られない(図-2)。
- (2) 変動成分の振幅 $a=0.1\Delta l$ の場合も全ての粒子密度に対して、ほぼ1に近い値をとる(図-4(a))。
- (3) 変動成分の振幅 $a=0.2\Delta l$ の場合、変動波長 $\lambda=4d_i$, $2d_i$ で粒子密度が30個以上のとき、正解率が8割以上になる。変動波長 $\lambda=1d_i$, $1/2d_i$ のケースでは全ての粒子密度に対して正解率が4割以下である(図-4(b))。
- (4) 変動成分の振幅 $a=0.3\Delta l$ の場合、変動波長 $\lambda=4d_i$ で粒子密度が30(個/検索領域)以上のとき、8割以上の正確さで追跡できる。変動波長 $\lambda=2d_i$, $1d_i$, $1/2d_i$ のケースでは、全ての粒子密度に対して正解率は4割以下であった(図-4(c))。
- (5) 変動成分の振幅 $a=0.2\Delta l$, 0.3 Δl の場合、変動波長の減少に伴い、正対応率は減少している。

図-3, および図-5は、縦軸に正しく計測されたベクトル密度、横軸に粒子画像密度を取ったものである。図より得られた結果を以下に示す。

- (1) 変動成分がない場合、および振幅 $a=0.1\Delta l$ の場合、ほぼ全てのケースについて粒子密度と正しく計測されたベクトル密度は等しくなる(図-3)。つまり、画像中

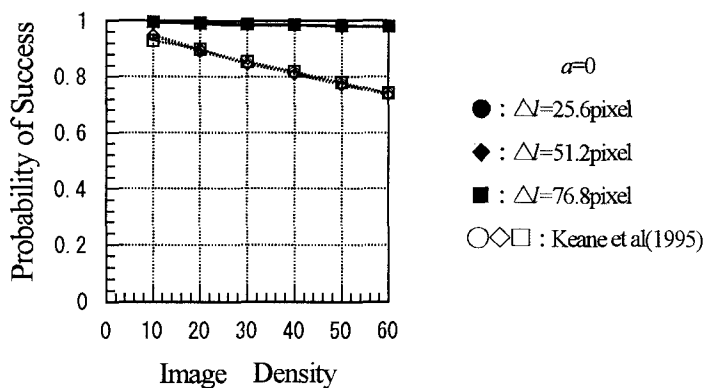
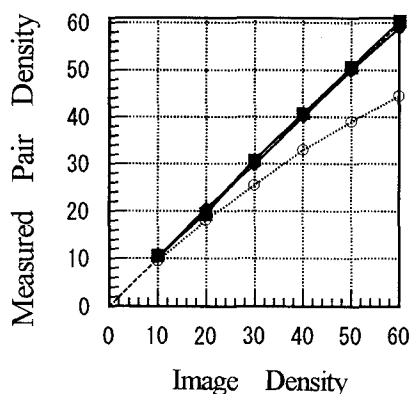


图-2 粒子画像密度 vs. 正対応率



(The case of the uniform displacement)

图-3 粒子画像密度 vs. 計測粒子対数

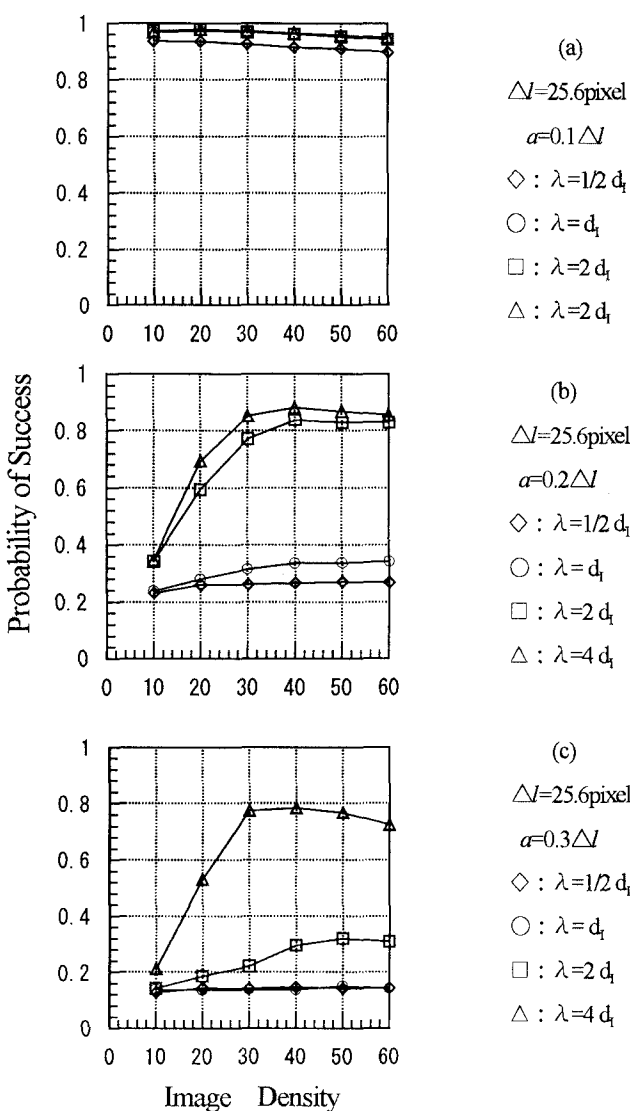


图-4 粒子画像密度 vs. 正対応率

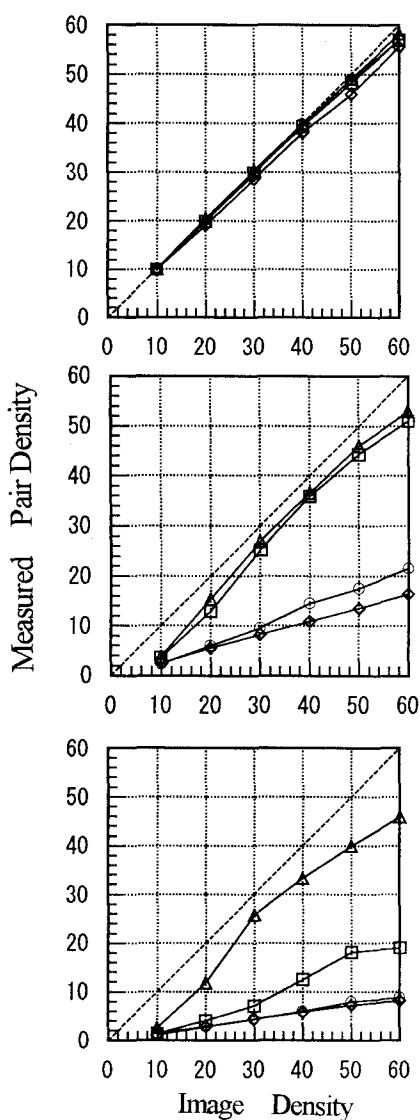


图-5 粒子画像密度 vs. 計測粒子対数

にある全ての粒子が計測されている。

- (2) 変動成分の振幅 $\alpha=0.2\Delta l$ の場合、および変動成分の振幅 $\alpha=0.3\Delta l$ の場合、図-2、および図-4の結果と同様に粒子密度の減少および変動波長の減少に伴い、正しく対応付いたベクトル密度は減少する(図-5)。

以上の結果より、今回行ったシミュレーションの条件下では、変動成分の振幅が $0.1\Delta l$ 以下の範囲では、ほぼ全ての条件で正確に追跡することができることが分かった。また、変動成分の振幅が $0.2\Delta l$ の場合でも、変動波長が検索領域サイズ以上で、かつ粒子密度が30 (個/検索領域) 以上あれば80%程度の正確さで追跡可能である。

5. 適用例

(1) Double-pulse/Single Image Case

Double-pulse/Single Image Caseとして、壁面境界層流れ場の計測に適用した。解析には4×5インチのフィルム画像を用いた。フィルム画像は、6つの領域に分割され、 522×522 pixelのデジタルCCDカメラ(コダック社製)により、コンピュータに取り込まれた。図-6に6分割されたデジタル画像の1例を示す。照明には、ダブルパルスのレーザーライトシートを用い、流れに平行な2次元断面が撮影された。

図-7に計測結果を示す。図-7(a)は標準相関PIVにより得られた格子点上の流速分布である。分割された各画像の周辺部分はPIVの解析には用いていないので、図中の中央部には流速ベクトルが存在しない。得られた流速ベクトル数は1802個であった。これを初期値として、Super-Resolution KC法により求めた結果が図-7(b)である。図中の座標値が図-7(a)の値より2倍になっているが、これはPMC法により粒子位置を求めるときに画素間でも演算を行っているためである。得られた流速ベクトル数は8479個であり、標準相関PIVに比べて約4.7倍の流速ベクトル数が計測された。

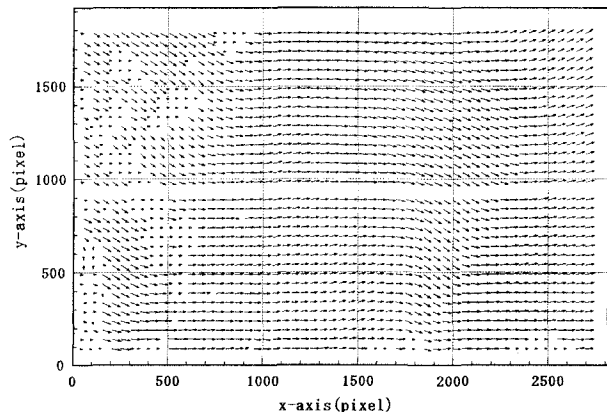
(2) Single-pulse/Double Image Case

Single-pulse/Double Image Caseとして、Rushton turbine内の流れの画像解析を行った。解析に用いた画像はSharpTMによって計測されたものである。計測には $1k\times 1k$ pixelのコリレーションカメラ(TSI製)を用い、SP/DFの画像を撮影した。照明には、ダブルパルスのNd:Yagレーザーを用い、シート光に広げ、2次的に照明された。撮影された画像はパーソナルコンピュータにデジタル画像として取り込まれ、処理された。標準相関法のソフトを用い、50%重なりでスキャンニングし、格子点の流速場を計測している。

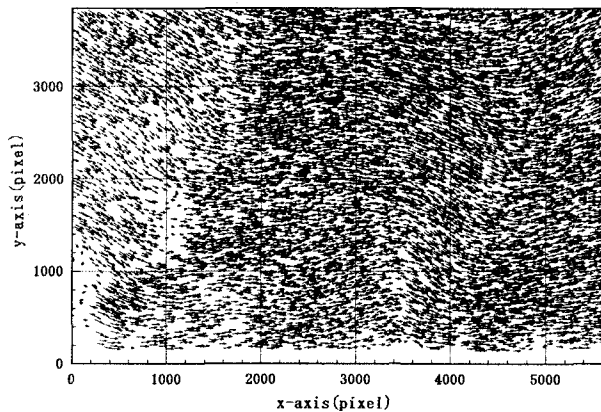
図-8に計測結果を示す。図-8(a)は標準相関法により得られた格子点上のベクトル分布図である。図-8(b)に今回提案されたSuper-Resolution KC法を用いて計測した結果を示す。図-8(b)は、図-7と同様の理由により、座標値が図-8(a)の2倍になっている。図中の左部の空白部はタービン翼の部分である。標準相関法により得られた格子点流速ベクトルの数は3067であり、Super-Resolution KC法により得られたベクトル数は9204であった。本手法が標準相関法に比べ約3.0倍の流速ベクトル数の計測が可能となっている。図からわかるように、標準の相関法の計



図-6 6分割された画像の1例(Double-pulse/Single-Image)

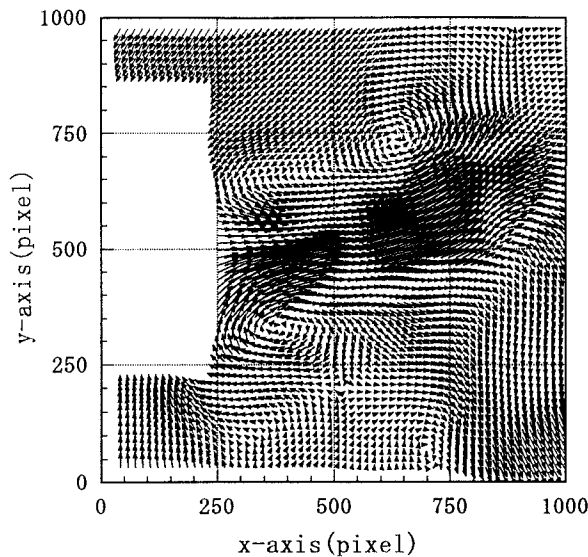


(a) 標準相関PIV法によって得られた流速分布

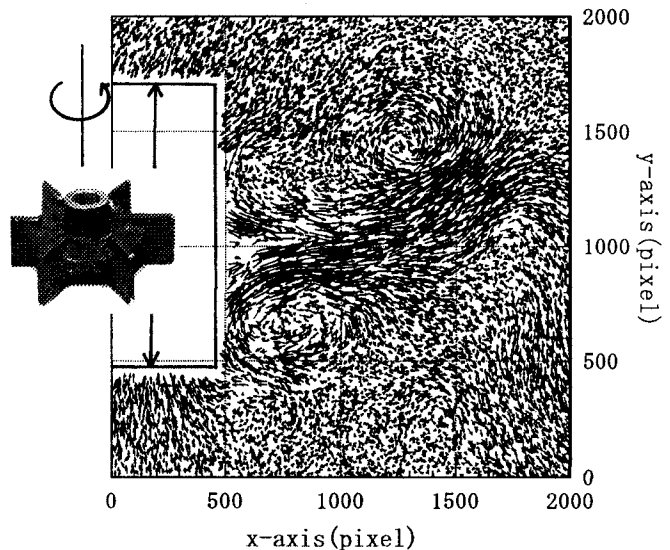


(b) Super-Resolution KC法によって得られた流速分布

図-7 Double-pulse/Single Image Caseの流れ場計測結果



(a) 標準相関PIV法によって得られた流速分布



(b) Super-Resolution KC法によって得られた流速分布

図-8 Single-pulse/Double Image Caseの流れ場計測結果(Rushton turbine flow)

測結果に比べ、Super-Resolution KC法による計測結果の方が小さな渦構造を計測できているのがわかる。

今回解析を行ったRushton turbine内の流れは3次元性の強い流れであり、シート光を入り出す粒子が多くある。2次元性の強い流れ場の計測では、より解像度の高い計測が期待される。

6. 結言

新しいSuper-Resolution PIVとして、Correlation PIV、カルマンフィルターと χ^2 検定による自動粒子追跡アルゴリズム(KC法)、および粒子マスク相関(PMC)法を用いたSuper-Resolution KC法を提案した。

シミュレーション画像を用いて、提案されたSuper-Resolution 法の性能を調査した。

模擬粒子画像が一様に移動するシミュレーションの結果より、以下のことが分かった。

- ①移動距離が $0.1 \sim 0.3d_i$ の範囲、および検索領域内粒子画像密度が $10 \sim 60$ の範囲において、ほぼ全ての粒子画像に対して正しく対応付けることができる。
- ②Keaneらの方法に比べて、本論文で提案している手法が大幅に改良されていることが明らかとなった。
- また、模擬粒子の移動に波動成分が加わったケースのシミュレーション結果により、以下のことが分かった。
- ③変動成分の振幅が $0.1\Delta l$ 以下の範囲では、ほぼ全ての条件で正確に追跡できることが分かった。
- ④変動成分の振幅が $0.2\Delta l$ の場合でも、変動波長が検索領域サイズ以上で、かつ粒子密度が30 (個/検索領域) 以上あれば80%程度の正確さで追跡可能である。
- ⑤変動成分の振幅 $a=0.2\Delta l$, $0.3\Delta l$ の場合、変動波長の減少に伴い、正対応率および計測粒子対数は減少している。

さらに、提案されたSuper-Resolution KC法は、実際の流れ場の計測に適用された。Double-pulse/Single Image CaseとSingle-pulse/Double Image Caseの2ケースの流れ場について計測を行った。両ケースにおいて、標準相関PIV法に比べて、Super-Resolution KC法による計測が3～5倍の流速ベクトル数を得ることができた。

参考文献

- 1) 例えば, Adrian, R. J., Christensen, K.T., Soloff, S.M. and Meinhardt, C.D.: Decomposition of turbulent fields and visualization of vortices and turbulent momentum transport, Proc. of the 8th Intl. Symp. on Flow Visualization, pp. 219.1-291.11, 1998.
- 2) 江藤剛治: 土木技術者が作る超高速ビデオカメラ, 土木学会誌, pp.12-14, 1999.2
- 3) Keane, R.D., Adrian, R.J. and Zhang, Y.: Super-resolution particle imaging velocimetry, Meas. Sci. Technol., 6, pp. 754-768, 1995.
- 4) 江藤剛治, 竹原幸生: 多数のトレーサー粒子の自動追跡のための新しいアルゴリズムの開発, 水工学論文集, Vol.34, pp.689-694, 1990.
- 5) 江藤剛治, 竹原幸生, 道奥康治, 久野悟志: PTVのための粒子画像抽出法に関する検討, 水工学論文集, Vol.40, pp.1051-1058, 1996.
- 6) 江藤剛治, 竹原幸生, 岡本孝司: 標準画像を用いた粒子マスク相関法とKC法の性能評価, 日本機械学会論文集(B編), 65巻633号, pp.184-191, 1999.
- 7) Sharp, K.V., Kim, K.C. and Adrian, R.J.: Dissipation estimation around a Rushton turbine using particle image velocimetry, Proc. of the 9th Intl. Symp. on Application of Laser Technique to Fluid Mech., 1998.

(1999.9.30受付)