136 粒子画像流速計のサブピクセル精度の評価とその向上

慶應義塾大理工 山口一喜[○]、前田昌信、榊原潤

Improvement and Evaluation of the sub-pixel accuracy on Particle Image Velocimetry

Kazuki YAMAGUCHI*, Masanobu MAEDA* and Jun SAKAKIBARA*

The use of interlaced CCD camera on Particle Image Velocimetry (PIV) by using a pair of frame images ultimates time interval acquisition. To dissolve this limitation, the method of using the pair of field images is more applicable and effective to measure high shear rate phenomena. However, use of field images leads to a reduction of the sub-pixel accuracy because of the lack of the spatial resolution compared with that of frame images. In the present study we simulated particle image field with uniform dispersion to determine the parameters which are effective in improving sub-pixel accuracy on field image PIV. Experiments indicate good agreement with simulated results. The accuracy can be improved up to ± 0.2 pixel, by compensation formula to reduce bias and RMS error.

1.はじめに

NTSC規格に準じた汎用ビデオカメラを用いた粒子画像流速計(PIV)はこれまでに様々な流れ場の計測に適用され、その有効性も既に実証されており、計測の誤差解析についてもこれまでに数多くの報告がなされている²⁾³⁾。

NTSC規格は画像の撮影あるいは表示にインターレース方式を採用している。インターレース方式は映像を撮影する際に1画面につき2回の走査を行い、1回の走査で得られる画像をフィールド画像、2回の走査で得られる画像をフレーム画像と称し、各フィールドの撮影時刻は1/60秒の時間差を伴う。フレーム画像を用いて流動場の計測を行う際はFig.1(2)に示すように各フレームで1回ライトシートを照射するため照射間隔は1/60秒以上である必要がある。一方、PIVで高速な流れを計測する際、Fig.1(3)に示すように隣接したフィールドでライトシートを照射し、片フィールドのみの画像対を用いることで撮影時間間隔を縮小する手法（以後フィールドモードと称す）が有効であるが、この場合画像の縦方向の解像度がフレーム画像の1/2となるために計測精度が低下する¹⁾。ところが、フィールド画像を用いた計測に

Fig.1 A timing diagram of CCD acquisition and the illumination of laser light sheet

ついでに定量的な誤差解析が十分になされているとは言いがたい。そこで本研究ではフィールド画像を用いた相互相関法PIVのサブピクセル精度の誤差解析と精度向上を目的としてCCDカメラによって撮影される粒子画像を計算機内で模擬することで数値シミュレーション及び実画像計測を行い、さらに精度に影響を与えるパラメータを定量的に評価し、精度向上のための補正法を検討する。

Fig.2 Schematics of computational grid

2.数値シミュレーション

2-1.濃淡粒子画像の作成

数値シミュレーションではCCDカメラによって撮影された粒子画像を計算機内で模擬するために、以下の方法を用いて粒子移動量の既知な2時刻における粒子画像を仮想的に作成した。CCDは入射光を電荷に変換し信号として出力する電荷結合素子である。CCDの各画素は、画素全体で入射光を受光するのではなく、その内側の開口部と呼ばれる領域で受光し電荷を蓄積する。撮影画像（疑似撮影画像）を忠実に

$$I_{CCD}(x_n, y_n) = \frac{1}{A} \int_{y_n \times N_y + o_y}^{(y_n+1) \times N_y - o_y} \int_{x_n \times N_x + o_x}^{(x_n+1) \times N_x - o_x} I_{src}(x_i, y_i) dx_i dy_i \quad (1)$$

再現するために、CCDカメラよりも高い解像度の像（元画像）を最初に作成した。元画像をFig.2に示すように升目上に区切りその中に開口部に相当する領域を設定した。開口領域の輝度を式（1）により平均化した結果を、対応する疑似撮影画像1ピクセルの輝度とした。 I_{CCD} は疑似撮影画像の輝度、 A は開口部の面積をそれぞれ表す。 A の面積は今回計算する粒径条件では誤差に影響を及ぼさないことが予備計算により確認されており、実際には開口比を44%に設定した。またフィールドモードでは偶数又は奇数行のフィールドで画像を構成するため、使用しないフィールドの輝度は使用するフィールド間で線形補間した値を与えた。元画像内の粒子位置はランダムに決定し、粒子数 N 及び粒径 D_p は任意に与え、粒子の輝度分布は正規分布を仮定した。なお、相互相関演算を行うリファレンス領域の大きさは実計測で採用している25X25ピクセルとした。

2-2.計算条件

粒子の移動量 V_d はY方向に0～1.9ピクセルを0.1ピクセル刻みに設定した。 $D_p=2,3,4$ ピクセルの各条件を与え、 N は1～10個の各条件を設定し、移動量の算出には相互相関演算を適用した。また、相関演算で得られる移動量はピクセル単位の精度であるので相関演算領域における相関関数の最大値近傍5点を正規分布で近似してサブピクセル精度を得た。以上の手順で、各条件において粒子配置の異なる $n=5000$ 回の計算を行った。

2-3. 計算結果

誤差解析は粒子移動量 V_d である第 i 番目元画像に対して算出された移動量を v_d^i としたとき、バ

$$B_d = V_{m,d} - V_d \quad (2)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_d^i - V_{m,d})^2 / (n-1)} \quad (3)$$

ias誤差 B_d および標準偏差 σ_d を、で定義して、その各々の値について評価した。ここで平均算出移動量は $V_{m,d} = (\sum_{i=1}^n v_d^i) / n$ である。また、予測される粒子移動量の精密度 δ は全 V_d にお

$$\delta = \sqrt{\sum_d \sum_i (v_d^i - V_d)^2 / (n-1)} \quad (4)$$

ける真移動量と算出移動量の差のRMSとして、と定義した。

$D_p=2,3,4$ の各条件での N と δ の関係をFig.3に示す。 $N \geq 5$ を満足すれば精密度は各粒径についてそれぞれ $\delta=0.6, 0.3, 0.2$ [pixel]となり、最小値に漸近する。そこで、Fig.4に $N=5$ における B_d 、 σ_d と V_d の関係を示す。Fig.4(1)より、計測結果には周期2ピクセルのバイアスがあり、算出移動量は偶数ピクセルに偏る。Fig.4(2)より標準偏差 σ_d は奇数ピクセルの移動量において $B_d=0$ となる点で極大値を持つという傾向を示した。また、粒径と誤差の関係については粒径が大きいほど全体的に誤差が小さくなることが確認された。

Fig.3 Effect of particle number

Fig.4 Bias and RMS error

3. 実画像を用いた誤差解析

3-1. 実験方法

シミュレーションの結果を評価するために実画像を用いた誤差解析を実験的に行った。実験は等速回転する透明な円筒容器にグリセリン溶液を満たし、これにトレーサ粒子を懸濁して速度を計測した。なおCCDカメラの解像度ではトレーサの粒径を定量的に評価できないため、像の拡大率およびトレーサ粒子径を実計測で採用しているものに設定して実験を行った。

3-2. 実験結果

実験は円筒の回転数一定で半径方向に速度のY方向成分分布を計測し、真値と計測結果を比較した。3種類の撮影時間間隔 Δt について実験を行った結果を、Fig.5に示す。いずれの Δt についてもシミュレーションで得られたような傾向を示す結果となった。また2-1で定義した精密度はほぼ ± 0.35 ピクセルであった。

3-3.補正曲線の適用

以上得られた結果から、検出される移動量は偶数ピクセルの移動量に偏る傾向があり、フィールドモードのバイアス曲線は2ピクセルの周期を持つことが確認された。そこでバイアス曲線は周期2ピクセルの関数で補正することが可能であると考え、3-2で得られた結果を基に以下の方法で算出した。補正後の移動量を v_e 、補正量を v_r すると v_e は

$$v_e = v + v_r \quad (5)$$

$$\text{ここで } v_r^i = F_r(v_d^i \bmod 2) \quad (6)$$

である。 F_r は平均算出移動量 V_m をもとに最小二乗法によって導かれる1周期のバイアス曲線を表す5次関数である。Fig.5の黒いプロットに補正後の結果を示す。補正曲線を適用することでバイアス誤差はほぼ除去され、Fig.5(2)に示すように標準偏差の分布もほぼ一様な分布に補正されている。またデータ補正後の全誤差は ± 0.2 ピクセルであり、サブピクセル精度は約40%向上した。

4.結論

フィールド画像を用いたPIVのサブピクセル精度の評価を行った結果、計測には周期2ピクセルのバイアス誤差が生じており、移動量が奇数ピクセルで、バイアス $B_d=0$ となる点において標準偏差は極大値を持つ傾向を示すことが明らかになった。しかし、トレーサ粒子径が等しい条件下で得られた補正曲線を適用することで精密度を ± 0.35 ピクセルから ± 0.2 ピクセルに向上させることが可能となり、サブピクセル精度向上のための手法として有効であることが示された。

参考文献

- (1) 榊原・菱田・前田, 画像処理による流動場の速度・温度同時計測法, Thermal Science & Engineering, 2-4, 1994b, 1-9
- (2) Prasad, A.K., Adrian, R.J., Landreth, C.C & Offutt, P.W., Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation. Exp. Fluids, 13, 1992, 105-116
- (3) 藤田・河村・近藤, 粒子画像のシミュレーションによる相関法の精度と精度向上に関する研究, 可視化情報, 11, Suppl.1, 1991.7, 173-177

Fig.5 Experimental Result