C 2 1 6

高せん断流れに対応する画像変形を用いた PIV

山本 恭史[○] (関西大学), 葛尾 文規 (関西大学大学院), 植村 知正 (関西大学)

Window deformation PIV for measurements of high shear-rate flows

Yasufumi YAMAMOTO, Fuminori KUZUO and Tomomasa UEMURA

ABSTRACT

In this paper, a window-deformation PIV was proposed in order to measure high shear-rate flows. For proper deformation, an appropriate velocity gradient tensor must be obtained. In the present approach, a method to extrapolate the velocity gradient from the region with higher reliability velocity was proposed. As a result of evaluation by using artificial images, it was found that the proposed method can be measure high-shear rate flows with little outliers.

Keywords: Window Deformation, PIV, High Shear-Rate Flow

1. 結 論

画像変形を用いる PIV⁽¹⁾は欧州ではかなり一般的になりつつある⁽²⁾. FFT に基づく PIV では, 相関窓のサイズは移動量と独立には決められず, 移動量に合わせて大きな窓を取る必要がある. そのため, 求まる移動量は空間平均された量となってしまう, 空間解像度が下がる. それを改善するために, 画像変形手法が開発されてきた.

FFT に基づく PIV のために開発されたその変形アルゴリズムを, 直接相関や輝度差累積法による PIV に適用して高精度化を図るには十分な検討が必要である.

我々はこれまで空間解像度を上げるために, 検査窓を段階的に小さくする手法を高速に行うアルゴリズムを開発し⁽³⁾, その手法に組み合わせる高精度なサブピクセル解析手法も開発してきた⁽⁴⁾. 本研究では, さらに検査窓を変形させることにより, 高せん断流れも高精度に計測可能な手法の開発に取り組む. 窓変形による限界について考察し, 変形に用いる速度が適切に求まらなかった場合でも高せん断流れに対応するアルゴリズムを提案する.

2. 窓変形 PIV の手続き

2.1 ベースとなる PIV

ベースとするのは, 我々が開発した選択画素により加速化された, 輝度差累積に対する逐次棄却法による Super-Resolution PIV⁽³⁾とする. テンプレートは隣接のものとは半分ずつ重なるように配置され, それらとの累積値分布の比較調査によりエラーチェックと補正が行われる.

2.2 窓変形 PIV (手法 A)

変形なしで計測された移動量を元に, 差分により速度勾配を求める. テンプレートの中心座標をその移動量の分だけ移動させた点を中心とする正方形のテンプレートを, 後に示す変換式の逆変換と共に一次内挿法により作成

する. このテンプレートで, 再度パターンマッチングを行い, 移動量を修正する. 画像変形は線形で行うこととし, テンプレートの座標 (x, y) に対して, 変形後の座標 (x', y') は, 次式で与えた.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_c + u \\ 0 & 1 & y_c + v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial u / \partial x + 1 & \partial u / \partial y & 0 \\ \partial v / \partial x & \partial v / \partial y + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_c \\ 0 & 1 & -y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

ここで, (x_c, y_c) はテンプレートの中心座標, (u, v) は 1frame 間の移動量である.

妥当な変形量を得るには, 移動量をサブピクセル精度で求めておく必要がある. サブピクセル移動量は, 著者らによる高精度でロバストな時空間微分法⁽⁴⁾によって求めた.

2.3 外挿による勾配を用いた変形 PIV (手法 B)

変形により計測精度を上げるには, 変形のための速度勾配が妥当に求まっていなければならない. しかし, この手法の適用対象は速度勾配の大きな流れ場であるため, 変形のための速度が妥当に求まる保証はない. この欠点を解消するために, 以下のアルゴリズムを考えた.

- まず, 手法 A により計測を行う. その速度を周囲のものと比較して誤ベクトルかどうか判定する.
- 誤ベクトルが少なく, 速度勾配も小さい計測点を信頼性の高いデータとして, 印をつける.
- 信頼性の高い計測点の集まった領域で速度勾配を計算し, 信頼性の低い領域に向かって, 速度勾配を外挿する.
- 外挿された速度勾配により窓変形を行い, 速度を再計測する.
- 周囲と速度勾配を比較し, 速度が連続とみなせる程度に, 妥当な速度と判定されたなら, さらに信頼性

の低い領域に向かって外挿・再計測を繰り返す。

3. 検証

人工画像(40000 個/512x512pix, 粒径: 平均 4pix, 標準偏差 1.2pix)を作成し, 開発した PIV の性能を評価した。テンプレートサイズは 32x32 を基本とした。ここで結果を掲載している流れ場は, 速度勾配としては $\partial u / \partial y$ のみが値をもつ場合のみについて示している。

3.1 窓変形の効果の確認

まず, 窓変形の効果があるかどうかを調べるため, セン断率のあまり大きくない条件で, 変形ありとなしで誤差の比較を行った。その結果を図 1 に示す。変形なしの場合には, セン断率が増えるに連れて飛躍的に誤差が増大するのに比べて, 変形ありでは, 誤差の増加割合が一定で低く抑えられることがわかる。

3.2 予測した速度勾配と実速度勾配の違い

流れ場の速度勾配に対して窓変形量がどの程度近ければ, もっともらしい速度が得られるのかを調べるため, 流れ場のせん断率 $S_{correct}$ と異なる速度勾配 S_{deform} で画像を変形した場合に, どのように精度に影響を及ぼすかを調べた。図 2 にその結果を示す。横軸 Δs はせん断率の差 (過小評価量) である。 Δs が 0.15 を超えると精度が急激に悪くなる。これは, テンプレートの両端における速度差 $32 \times 0.15 = 4.8$ が粒子径を確実に上回る場合に対応する。

また, 実際のトレーサ粒子は速度勾配により歪むことはないが, 画像を変形すると, その個々の粒子像は歪んでしまうため, たとえ速度勾配が正確であっても, 計

Fig.1 Effect of window deformation.

Fig.2 Effect of underestimation of velocity gradient.

測される速度は精度を保てるわけではない。図 2 において $\Delta s = 0$ が正確な変形に対応するが, 流れ場のせん断率が上がるに連れて精度が悪くなることが分かる。

3.3 外挿勾配による変形手法の効果

図 3 に周期 1024 振幅 70.4 の正弦波状の速度分布 (速度勾配の最大値は 0.42 /frame) を持つ場を計測した結果を示す。手法 A による結果を (a) に示すが, 速度勾配が大きいため多くの誤ベクトルが発生している。一方, 手法 B (図 3(b)) では, そのような誤ベクトルは見られず, 妥当な速度が計測されている。

4. まとめ

窓変形を行う PIV を開発し, その性能を調べた。窓変形を行うには, 変形に使用するのに妥当な速度場が得られる必要があることを確認し, 変形量を推測する手法を提案した。提案手法により, 非常に大きな速度勾配をもつ流れ場も計測できることが確認できた。ただし, サブピクセル精度は流れ場の勾配が大きくなればなるほど低下するため, 精度を追求するなら, 歪んだ粒子像に対応する更なる工夫が必要である。

参考文献

- 1) 例えば, Scarano, F., Meas. Sci. Technol. Vol.13 (2002) R1-R19.
- 2) Stanislas, M., Okamoto, K., Kahler, C., Meas. Sci. Technol. Vol.14 (2003) R63-R89.
- 3) Yamamoto, Y., Uemura, T., J. Visualization, Vol.6, No.3 (2003) pp.263-272.
- 4) 山本, 植村, 米原, 機論, 70-695B (2004) pp.53-60.

(a) by method A

(b) by Method B

Fig.3 Measurement results for the sinusoidal velocity field.