112 逐次棄却法 P I V 解析の精度向上に関する検討

関西大院 寺西 卓也[○], 利安 忠, 片山 嘉一郎, 関西大 植村 知正

Study on Sub-Pixel PIV Using Successive Abandonment Method

Takuya TERANISHI*, Tadashi TOSHIYASU*, Kaichiro KATAYAMA*, Tomomasa UEMURA*

In order to improve the measurement accuracy of the successive abandonment method, three sub-pixel analysis methods are examined about their precision and analysis time. Among them, the weighted average method has the lowest precision. And two others, a reflection point method and a shifted template method, have similar precision. Measurement precision is examined by rotating and shifting a solid pattern. As for analysis time, so far, the former method seems to be faster than the latter.

1. はじめに

逐次棄却法^{1), 2)}は P I V の高速アルゴリズムとしてよく知られているが計測精度はピクセル単位である。そこで著者らは精度を向上させる方法として荷重計算を用いたサブピクセル精度での移動量計測法として荷重平均法を提案した³⁾が、その精度は十分とは言えなかった。

本論文では、さらなる計測精度の改善を目的として新たに2種類のサブピクセル精度での移動量計測法を考案し、精度と解析時間について検討を加えた。

2. サブピクセル精度の計測方法

サブピクセル精度での計測はピクセル単位で得られるデータを元に行われている。そこでまずピクセル単位での移動量を求める方法である輝度差累積法について述べる^{4), 5)}。

連続した2枚の画像で時間が先の画面を第1画面(P)、後の画面を第2画面(Q)とする。第1画面から適当な大きさ($n \times n$)で部分画像を切り出す(テンプレート画像)。テンプレート画像の濃淡分布に最も類似している部分画像を第2画面の中から探索する。このとき、テンプレートと第2画面の部分画像との間でそれぞれ対応す

る画素の輝度差の絶対値を計算し、その累積値(R)を求める。(1)

$$R_{ij} = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-1} |p_{i+k, j+l} - q_{i+k+\Delta x, j+l+\Delta y}| \quad (1)$$

p_{ij} : 画像Pの座標(i, j)の輝度値

q_{ij} : 画像Qの座標(i, j)の輝度値

$\Delta x, \Delta y$: 画像PとQのずれ量

輝度差累積値を類似性の判定に用い、その累積値が最も小さい場合の部分画像の中心画素をテンプレート画像の中心画素の移動先座標とするのが輝度差累積法である。

またこのとき、探索領域内でRの最小値 $R_{\min}$ をもつ座標を能率良く求めるために、テンプレート1行ごとにRを計算し、Rがしきい値を超えたら候補から除外する方法が逐次棄却法である。このときのしきい値を決定する手法としてF検定の考え方を利用している。

以上の方法で決定されたピクセル単位の計測を元にしてサブピクセル精度での計測を行う。

2.1 荷重平均法 (Type1)

ピクセル単位の計測において、輝度差累積値が最小となる付近の3次元の累積値分布は Fig.1 のようになり累積値が最小となる点からどの方

* Kansai University, 3-3 Yamate, Suita, Osaka 564-8680

向にも単調に増加していることが多い. このように累積値の分布が滑らかな形になっていれば累積値が小さいほど重みを大きくした荷重計算で求められる累積値分布の重心がサブピクセル精度の対応点と考えることができる. このときの重みは荷重計算に用いる輝度差累積値の最大値からの差とする. 荷重平均法を用いて求められるサブピクセル精度の対応点の座標(X_s, Y_s)は(2)式で求められる.

Fig. 1 Distribution of accumulated absolute brightness difference. Ordinate is reversed in order to observe the bottom curve.

$$X_s = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad Y_s = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (2)$$

$$W_i = R_m - R_i$$

X_s, Y_s : ピクセル単位の対応点座標

W_i : 荷重計算の重み

R_m : 輝度差累積値の最大値

R_i : 座標(X_i, Y_i)に関する輝度差累積値

N : 近傍点の数

2.2 近似直線の交点を対応点とする方法 (Type2)

ピクセル単位の計測で輝度差累積値が最小となる付近における x 軸方向の累積値の変化を見てみると Fig.2 のように最小値付近では累積値の変化が直線的になっていることが多い. そこでこの特性を利用して Fig.3 のように最小値付近の累積値の分布から 2 本の近似直線を求め, その交点をサブピクセル精度の対応点とする.

Fig.2 Distribution of R near the minimum point

Fig.3 Estimation of reflection point

2.3 ずらし画像をテンプレートとして用いる方法 (Type3)

ピクセル単位の計測ではパターンマッチングをする際, (1) 式で述べた $\Delta x, \Delta y$ のずらし量は 1 ピクセル単位である. 1 ピクセル以下 (例えば 0.1 ピクセル) の単位でずらせた画像があれば, サブピクセル単位の移動量を決定できると考えられる. 0.1 ピクセルずらしたときの輝度値は存在しないので近傍の輝度値を用いて内挿する. 座標(i, j)から x 方向に f (0.1~0.9) ずらした位置($i+f, j$)での

輝度値 $q_{i+f,j}$ は以下のようにして求める。

$$q_{i+f,j} = q_{i,j} \times (1-f) + q_{i+1,j} \times f \quad (3)$$

Δx , Δy の値を 0.1 ピクセル単位で計測して輝度値累積値が最も小さい点をサブピクセル精度の対応点とする。

実際にパターンマッチングのずれ量を 0.1 ピクセル単位にして計測した結果の輝度差累積値の分布を Fig.4 に示す。この場合は x 座標が 265.2 のとき、累積値が最小値をとっている。

Fig.4 Distribution of R near the minimum point measured by sub-pixel accuracy

3. 精度の検討

2項で述べた3つの方法から得られるデータの精度を検討するために Fig.5 の画像を用いる。この画像は厚紙にランダムに黒のスプレーを吹き付けて濃淡分布を作ったものである。検討する方法として、Fig.5 の画像を画像処理ソフトで y 軸方向に 7 画素ずらしたものと、Fig.5 の画像を回転させたものを解析した。画像をずらしたものをを用いるのは移動量が正確に分かっているからであり、回転した画像を用いるのは剛体回転場では V_{x-y}, V_{y-x} 関係はそれぞれ直線になることを利用するためである。

y 軸方向に 7 画素ずらしたものを Type2 の方法で解析した結果を Fig.6 に、移動量の分布を Fig.7 に示す。また3つの方法による移動量 7pixel からのデータのばらつきを Table1 に示す。Type3 の方

法の移動量は 0.1 ピクセル精度ではすべて 7.0pixel であった。

Fig.5 Test image

Fig.6 Displacement vectors measured by Type2 method

Fig.7 Histogram of V_y measured by Type2 method

Table1 Measurement uncertainty for parallel displacement

	Type1	Type2	Type3
Measurement uncertainty (pixel)	0.31	0.03	0.0

次に回転した画像を Type3 の方法で解析した結果を Fig.8 に, 得られたデータの V_x - y 関係を Fig.9 に示す. また 3 つの方法による近似直線からのデータのばらつきと解析時間を Table2 に示す. Type2 と Type3 の近似直線からのばらつきの差は 0.02 でありこれは誤差の範囲であると考えられる. しかし解析時間を比較してみると Type3 は Type2 の約 1.7 倍かかっている.

Fig.8 Displacement vectors measured by Type3 method

Fig.9 Liner correlation between y vs. V_x measured by Type3 method

Table2 Measurement uncertainty for solid rotation and analysis time

	Type1	Type2	Type3
Standard deviation (pixel)	0.33	0.27	0.29
Analysis time (ms/vector)	7.18	6.45	10.87

4. 結論

今回サブピクセル精度の計測法として荷重平均法, 近似直線の交点を対応点とする方法, そしてずらし画像をテンプレートとして用いる方法で解析した結果, 以下のような結論を得た.

- 1) 今回新たに提案した近似直線の交点を対応点とする方法とずらし画像をテンプレートとして用いる方法は荷重平均法よりも良い計測精度が得られた.
- 2) ずらし画像をテンプレートとして用いる方法は近似直線の交点を対応点とする方法と比較して計測精度はほぼ同等であるが, 解析時間が約 1.7 倍かかる.

参考文献

- 1) 加賀ら, 気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報, 14-53, 1994, pp.108-115.
- 2) 利安ら, C I Vのための高速解析ソフトウェアの開発, 16-Suppl.2(1996), pp.61-64.
- 3) 利安ら, 逐次棄却法の精度向上に関する検討, 可視化情報, 17-Suppl.1(1997), pp.125-128.
- 4) 利安ら, 逐次棄却法の精度向上に関する検討 II, 可視化情報, 17-Suppl.2(1997), pp.95-98.
- 5) 利安ら, 逐次棄却法による P I V の処理速度向上と高精度化, 第 36 回計測自動制御学会学術講演論文集, pp.595-596.