39 画像処理による速度場自動計測とトレーサ粒子の追跡法

東大生研 小林敏雄、佐賀徹雄[○]、瀬川茂樹

An Automatic Velocity Measurement using Image Processing
Technique and its Particle Tracking

Toshio KOBAYASHI, Tetsuo SAGA, Shigeki SEGAWA

The purpose of this paper is to devise a high-speed image analysis algorithms. When the velocity vectors are derived from the pictures with a small time-difference, the one-to-one correspondence of tracer images must be found among the pictures. In this paper, a unique idea is presented for the automatic tracer tracking and the identification of tracer images.

1. まえがき

粒子トレーサ法で可視化した流れ場の画像解析は非接触に同時刻の空間速度分布を求めることが出来ることから、非定常現象を対象とした多くの解析が試みられている^{1,2,3}。多数のトレーサ粒子の動きを解析して速度ベクトルを決定する場合、異なる時刻間の粒子の対応づけが問題となる。本報ではトレーサ粒子の自動追跡とその移動経路の認定について、高速性をもつアルゴリズムの開発を行なったので、その具体的方法と結果を報告する。

2. 画像処理の手順

開発したアルゴリズムを適用するための画像処理ハードウェアは、シャッター機構を持つCCDカメラ(ナショナルAG300、フレーム間隔1/30秒、シャッター速度1/1125秒)、画像処理装置(NEXUS6410、512×512×8bit×16画面)およびパーソナルコンピュータ(PC9801VM2)で構成される簡便なシステムである。主流速度 $U = 0.2\text{m/s}$ の流れに直径40mmの円柱を静置し、ナイロントレーサ粒子(直径 $\sim 1\text{mm}$ 、比重 ~ 0.98)を散布しその動きを解析する。

本システムにおける画像処理方法の概略を図1に示す。画像処理プログラムはPascal言語で記述されている。システムは連続する4時刻分の瞬間画像を用い、Changら⁴の提案したアイデアを基に独自に粒子対応づけを自動的、オンライン的に実現したものである⁵。対応づけにあたっては画像入力の時間間隔は十分に短くかつ一定であること、流れの速度が空間的・時間的に急激に変動しないことを仮定している。シャッター付TVカメラから入力された画像(図2)は各フレーム、各フィールド毎に短時間露光が行なわれているので、これを奇数フィールドと偶数フィールドに分離する。対象画像は背景処理、フィールド分離と補間操作を施して作成する。供試体の位置はトレーサ粒子を注入する以前の基準画像(背景画像)を用いて決定している。つぎに、対象画像を選定したしきい値で2値化し、縮小・拡大処理を施してノイズを除去する。白い部分の構成画素数を調べ、接触する粒子や

Fig.1 Procedure of image processing

Fig.2 Input images by TV camera

Fig.3 Velocity vectors

その他のノイズを除去しこれにラベリング処理を施す。4時刻(時間間隔: $\Delta t = 1/30$ 秒)の連続する画像についてこれらの前処理を施しトレーサ粒子だけを選別する。各粒子の重心位置 P をその構成画素から決定し、記憶しておく。次に、各トレーサ粒子を追跡して、4時刻分の粒子経路を決定し、それらの経路を認定すると図3に示すような速度ベクトルが求められる。以下に、トレーサ粒子を追跡する方法と粒子経路の認定方法について詳述する。

3.1 トレーサ粒子の追跡

トレーサ粒子の対応づけは時刻 $t_0 \sim t_3$ までの4時刻のトレーサ粒子重心位置 P を用い図4に示すような方法で行う。まず、時刻 t_0 の画像中にある粒子重心位置 $P_{0,n}$ のうちから画面走査方向の順位で検出された粒子重心位置を最初の $P_{0,1}$ として選び、これを中心とする円形の探索領域 S_1 を時刻 t_1 の画像中に設定する。探索領域 S_1 の大きさは、時刻 t_0 における粒子の速度ベクトル V が未知であるため流れ場全体で予想される入力時間間隔内の最大移動距離程度の値を半径とする円形領域として定義する。ここでは S_1 の半径 R_1 を $R_1 = 2.0 \bar{U} \cdot \Delta t_1$ ($\bar{U}$:主流平均速度、 Δt_1 :時刻 t_0 から時刻 t_1 までの時間間隔)に設定している。つぎに、この領域 S_1 内で粒子 $P_{0,1}$ の時刻 t_1 における移動先を検出する。粒子の検出順位を画面走査方向とし、最初に検出された粒子の重心位置を $P_{1,1}$ とする。つぎに、この $P_{1,1}$ の速度ベクトルを

Fig.4 Particle tracking

$P_{0,i}$ 、 $P_{1,i}$ と Δt_1 (ここでは1/30秒)とから算出される速度ベクトル $V_{1,i}$ と仮定し、時刻 t_2 の画像中に $P_{1,i}$ から $(V_{1,i}) \cdot \Delta t_2$ の位置に次の探索領域 S_2 の中心 Q_2 を設定する。このとき S_2 の大きさは処理速度を上げるため S_1 にくらべ探索領域の大きさを減少させ、その半径 R_2 を $R_2 = 0.4 \bar{U} \cdot \Delta t_2$ に設定している。 S_2 においても上述のように探索を行ない、粒子 $P_{2,i}$ を検出する。つぎに、時刻 t_3 の画像中にも探索領域 S_3 を設定し粒子位置の検出を行なうが、 S_3 の中心位置 Q_3 は粒子の時刻 $t_0 \sim t_2$ 間の移動履歴を考慮して定める。すなわち、 $P_{0,i}$ 、 $P_{1,i}$ 、 $P_{2,i}$ のなす角度(補角) θ_a と $P_{1,i}$ 、 $P_{2,i}$ 、 Q_3 のなす角度(補角) $\theta_{a'}$ が等しく、かつ $P_{2,i}$ から $(V_{2,i}) \cdot \Delta t_3$ の位置に S_3 の中心 Q_3 を定める。 S_3 の半径 R_3 は $R_3 = 0.4 \bar{U} \cdot \Delta t_3$ とする。 S_3 においても同様の手順で粒子 $P_{3,i}$ を検出すると、 $P_{0,i}$ 、 $P_{1,i}$ 、 $P_{2,i}$ 、 $P_{3,i}$ は4時刻間の粒子の一つの仮想経路とみなすことができる。もし、 S_1 、 S_2 、 S_3 に存在する粒子がそれぞれ1つの場合、これを同一粒子の経路として認定する。しかし、 $S_1 \sim S_3$ 内に複数個の粒子が存在する場合には粒子 $P_{0,i}$ に関してすべての経路を求め、その中から妥当と判断される1つの経路を選別する。

4. 相関法による粒子経路の認定

上述の処理を図2の入力画像を始点とする連続4時刻の画像に施すと、図5に示すような時刻 $t_0 \sim t_3$ 間の粒子経路が求められる。図中には同一粒子座標を共有する粒子経路が含まれている。この中から妥当な粒子経路を選別するためには、4時刻間の粒子の移動距離と角度の分散から経路を判定する方法があるが⁴⁾、ここでは相関法を用いる。図6(a)に例示するような、時刻 t_n で粒子位置が重複する2つの粒子経路の判別についてその処理方法を示す。ある時刻 t_n における粒子配列のパターンは入力時間間隔 Δt 内で流れに急激な変動がなければ、微小時間後 $t_n + \Delta t$ のパターンは類似であることを仮定し処理を行なう。重複する粒子重心位置 P を中心とする小領域(A画像; $N \times N$ pixelのマトリックス)の濃度パターンと、時刻 $t_n + \Delta t$ における複数の候補粒子の重心位置 P_{B1} 、 P_{B2} 等を中心とする小領域(B_1 画像、 B_2 画像・・・)の濃度パターンの相互相関係数(R_{AB1} 、 R_{AB2} ・・・)を比較して、相関値の高い方の候補粒子の重心位置を選別する方法である。2画像間の濃度相関 R_{AB} は、

$$R_{AB} = \frac{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (a_{ij} - \bar{a}) \cdot (b_{ij} - \bar{b})}{\left[\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (a_{ij} - \bar{a})^2 \cdot \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (b_{ij} - \bar{b})^2 \right]^{1/2}}$$

ここに $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ はそれぞれのマトリックスの平均濃度である。

処理手順は、まず(1)時刻 t_n の画像中に粒子 P_A の重心を中心とする小領域を設定し、同様に(2) $t_n + \Delta t$ 画像中にも P_{B1} 、 P_{B2} の重心を中心とする小領域の設定する。つぎに、

Fig.5 Particle paths at the four time steps

(a) Overlapped paths

(b) $N \times N$ matrices for correlation

Fig.6 Particle path and correlation matrix

(3) RAB1, RAB2を算出し、それぞれを比較して最大相関係数RMを判定する。(4) RMと相関しきい値RTHを比較し粒子経路を選別する(RM > RTHの場合; RMの粒子重心位置を持つ粒子経路を選別し、その他の粒子経路の粒子重心位置を消去する。RM < RTHの場合; 両粒子経路の粒子重心位置を消去する。なお、本報ではRTHを0.6に設定し、不確かな認定をさけている)。(5)全重複経路について(1)~(4)の処理を重複がなくなるまで繰返し、選別処理を終了する。

図7に2時刻間の相互相関係数のマトリックスの大きさによるRの変化を示す。図7(a)は、すでに妥当なものと認定されている単独の粒子経路についてRを求めたもので、マトリックスの大きさによらず高い相関が認められる。この図から、対象粒子まわりの粒子配列のパターンは入力時間間隔内($\Delta t = 1/30$ 秒)では大きな変化はしないと言う、上記の仮定が成立していることが分かる。図7(b)は重複粒子経路におけるRAB1, RAB2を同様に求めたもので、この図からはマトリックスが小さすぎると対象粒子(平均粒子径 ~ 7 pixel)の周辺の粒子配列パターンが相関値に反映されることがわかる。マトリックスの大きさは処理速度と密接に関連しているで、本報では 50×50 pixelに設定して処理を行なっている。マトリックスをこの大きさに設定した時、RAB1とRAB2の間には明らかな相違が現われ、本方法による認定が有効である事が認められる。図8に重複する粒子経路の基準画像Aと2つの候補粒子の周辺(30×30 pixel)の画像B₁, B₂の濃度分布を示す。相関の高いB₁画像の中心の粒子を選別している。以上の処理を図5に施し、速度ベクトルとして表示したものが図3である。重複する粒子経路の一組あたりの選別時間は 50×50 pixelのマトリックスの場合、約11秒である。

4. まとめ

粒子経路を選別する方法として、相関法を用いたアルゴリズムを開発した。これを、パーソナルコンピュータで構成した簡便な画像処理システムの自動処理に適用し、その有効性を確認した。

参考文献

1. Chang, T. P., et. al., Optical Engineering, 23, 3, 1984, 283.
2. 山川ほか, 流れの可視化, 6, 22, 1986, 273.
3. 笠木ほか, 流れの可視化, 7, 26, 1987, 283.
4. 小林ほか, 機械学会論文集 B, 投稿中.

(a) Identified path

(b) Overlapped paths

Fig.7 Cross correlation function

(a) A (Standard matrix)

(b) B₁ (RAB1=0.975)

(c) B₂ (RAB2=0.548)

Fig.8 Density distribution in the correlation matrix