

流体表面の速度分布を高精度にとらえる動画像解析システム

株式会社 シーイーデーシステム

1. はじめに

監視カメラからの映像情報を利用して流体の表面(表層)速度分布を動画像処理から求める、河川表面速度測定「IBS モデル RIVANA」装置について原理と応用を紹介する。非接触測定は、自然環境における流体の速度測定や危険な流体のため接触して計測ができない状況下で有効であり、当製品の主たる利用目的としている。ITV カメラに装着する光学レンズ選択により、野外での広範囲な領域内の流体平均速度を求めることや逆に顕微鏡カメラに写された微小な流体解析などへの応用も考えられる。

現在、画像処理で流体速度を計測する方法は、トレーサ粒子の挙動を解析する PIV 理論が広く用いられているが、自然環境下や稼働プラントでの計測にはトレーサ粒子散布の点で現場での実用化には問題が残る。

本装置の速度抽出は、連続動画像からの濃淡(輝度分布)情報を処理する時空間微分法(オプティカルフロー推定)を採用している。流体を写すカメラ映像信号は 3 次元空間に流れるようすをカメラ受光平面に射影した濃淡度情報である、画像処理から得る抽出速度ベクトル場は当然 3 次元の運動情報である。カメラの撮影空間内を流れる液体や固液混相流の速度ベクトル成分は流れる平面に分布する。当装置は、流体の速度ベクトル場は特定平面(ほぼ地表面)のみに存在する限定条件を取り入れて複雑な 3 次元処理を回避している。この限定は、抽出した速度ベクトルの幾何補正処理で流体表面の速度成分に導くことが可能となる。

時空間微分法から算出する局所の速度ベクトル場は、滑らかな流場を前提とする理論背景から近傍周辺のベクトル場との相関統計処理を行い、速度情報の信頼性を高めている。

2. オプティカルフロー推定とは

はじめに、本装置で採用しているオプティカルフローについて基本計算方法を示す。Optical Flow は観測者が感じる画面上にある物体の見かけ速度分布を指す。それを決定する基本式は2つの仮定から導出される。その1つは、対象となる物理点の持つ濃淡値が運動に際して一定に保つこと。時刻tにおける画面上にある点(x, y)の濃淡値をP(x, y, t)とし、微小時間 t 後は物理点が点(x+ Δx, y+ Δy)まで移動しその濃淡値をP(x+ Δx, y+ Δy, t+ Δt)とすると、次式が成立する。

$$P(x, y, t) = P(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \dots\dots\dots (1)$$

それを Taylor 展開し、 Δt を0に極限を取ると、次式が得られる。

$$uP_x + vP_y + P_t = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ただし、(u, v)は見かけ速度ベクトルであり、P_x, P_y, P_t はx, y, t に対する偏微分である。

もう1つの仮定は、見かけ速度は滑らかに変化することである。速度の滑らかさは速度ベクトルのラプラシアンで評価する。

$$E_c = \nabla u^2 + \nabla v^2 \dots\dots\dots (3)$$

実際に計算するには、(2)式のP_x, P_y, P_tは有限差分で近似し誤差をもたらす。(3)式も離散化する必要があり、実際には速度分布の滑らかさを次式で評価する。

$$E_b = uP_x + vP_y + P_t \dots\dots\dots (4)$$

$$E_b^2 = (\bar{u} - u)^2 + (\bar{v} - v)^2 \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 \bar{u}, \bar{v} は近傍速度ベクトルの平均値である。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}(i, j) = \frac{1}{12} \{u(i-1, j-1) + u(i+1, j-1) + u(i-1, j+1) + u(i+1, j+1)\} \\ \quad + \frac{1}{6} \{u(i-1, j) + u(i, j-1) + u(i, j+1) + u(i+1, j)\} \\ \bar{v}(i, j) = \frac{1}{12} \{v(i-1, j-1) + v(i+1, j-1) + v(i-1, j+1) + v(i+1, j+1)\} \\ \quad + \frac{1}{6} \{v(i-1, j) + v(i, j-1) + v(i, j+1) + v(i+1, j)\} \end{array} \right.$$

重み係数 α^2 を導入して(4)式と(5)式を統合すると、次式のような誤差評価式が与えられる。(重み係数 = 正則化パラメータ)

$$E = \iint (E_b^2 + \alpha^2 E_c^2) dx dy$$

誤差Eが最小値を取る条件で速度分布の計算式が得られる。
結局、次式を反復して収束すれば速度分布が求められる。

$$\begin{cases} u^{k+1} = \bar{u}^k - P_x \frac{P_x \bar{u}^k + P_y \bar{v}^k + P_t}{a^2 + P^2 + P_y^2} \\ v^{k+1} = \bar{v}^k - P_y \frac{P_x \bar{u}^k + P_y \bar{v}^k + P_t}{a^2 + P^2 + P_y^2} \end{cases}$$

ただし、k は反復回数である。

動画像の測定領域内の演算点で算出した局所瞬時ベクトル場のすべてを速度要素としてその後、統計値処理を行い、流体表面速度へと適用している。

オプティカルフロー推定を液体や固液混相流の流体表面に適用すると、面像に写る表面素性により結果に大きな差が見られる。

液体の流れでは滑らかな速度ベクトル場が得られるが、明確な輪郭成分を持つ物質が混じる固液混相流では空間濃度の微分成分が強く影響する。これはオプティカルフローの演算結果には、見かけ速度と流体表面模様の情報が混在していることになる。

当装置はこの分離に統計的手法を用いている。母集団を多くする必然があるが、演算点の個数は空間および時系列ともに演算速度との兼ね合いで決定している。

3. カメラ幾何補正方式(単眼カメラ映像から目標までの距離測定)

カメラ映像より抽出した見かけ速度場を実速度に変換しなければならない。カメラから測定平面までの距離を求めるため、光学的幾何補正を行う。

通常、設置した映像カメラは被写体との傾きがあり歪んだ映像を取り込む。それから抽出した速度分布を実速度に換算する必要がある。

映像データの歪みはカメラの機種、装着レンズの種類、仰角および被写体までの距離などに関係がある。

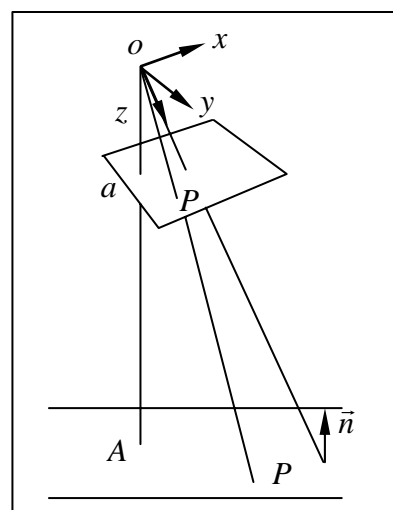


図1 単眼カメラからの距離測定法

カメラの機種、装着レンズの種類は通常既知であるが、仰角および被写体までの距離は場合によっては計りにくいこともある。

以下は、筆者らが考案した単眼カメラでの距離測定であり、被写体平面上に存在する既知4点の相互距離から計算する方法である。

図1に示すように、レンズの焦点 o に座標系 o, x, y, z を取る。 o, x, y 平面はカメラ受光平面に平行する、

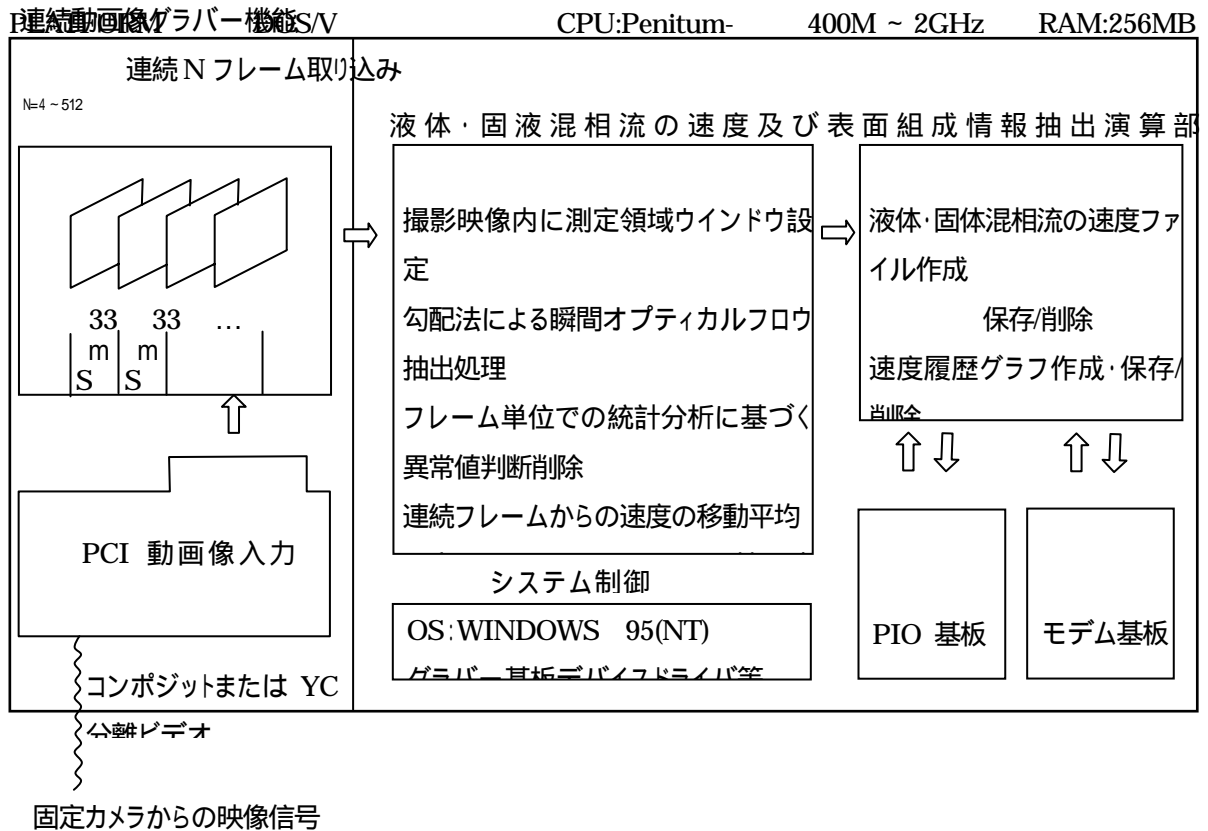
被写体平面の法線ベクトル \vec{n} および像点 \vec{oa} とその対応点 \vec{oA} の関係を決定すれば、画面上にある任意の点の被写体平面上の対応点 \vec{oP} が次式で求められる。

$$\vec{oP} = \frac{\vec{n} \cdot \vec{oA}}{\vec{n} \cdot \vec{op}} \vec{op} \dots\dots\dots (6)$$

被写体平面上任意4点 A, B, C, D 間の距離を事前に計れば、既知のレンズ焦点距離を利用して、A, B, C, D とその像点 A, B, C, D との幾何学関係から \vec{n} および \vec{oa} と \vec{oA} の対応付けが決定できる。それによって、推定速度が容易に実速度に換算できる。

また、カメラから被写体までの距離も算出できる。

図2 河川表面速度測定装置「IBS モデルRIBANA」



4. 「IBS モデル RIVANA」の構成と応用用途

本装置はプラットフォームにパソコンを採用している。図2に構成を示す。

最近のパソコンの処理能力は動画処理にも十分活用でき、速度演算の処理時間は1秒未満である。速定周期は0.5秒単位の任意設定でリアルタイムに速度結果を出力できる。

測定条件などはマウス操作で簡単に入力できる。キャプチャ映像、速度履歴ファイル、グラフを画面に切り替えて表示するGUIを持つ。

用途は河川や放水路の流速測定、汚水・泥流・土石流の流速警報装置、プラントでの固液混相流の速度計測である。

本装置は、撮影している流れの局所流速ベクトルを保有しているため、流れ分布が可視下できる。写真1は渦のようすを的確に可視化している。

放水路や取り込み水路での水流方向、渦流、澱みを把握する定量データとして利用できる。

5. 追論

画像処理の宿命である被測定部の映像の明るさやコントラスト変動が極力速度ベクトル量に影響してはならない。本装置は画質による補正制御を行っているが、画質劣化は十分注意すべき点である。

オプティカルフロー推定抽出の弛緩法の演算量は膨大であり、最近の高性能なパソコンの出現で具現下できた。演算は画像データの微分値を扱うため、グラバ基板は精度が要求される。

6. 推定瞬時速度ベクトルの計算フロー

