# 複雑流動計測のための二視点系三次元PTVに関する基礎的研究

A Fundamental Study on the Two Perspective 3D-PTV system for Measurement of Complicated Flow

# 中條壮大<sup>1</sup>·重松孝昌<sup>2</sup>·馬瀬慎也<sup>3</sup>

## Sota NAKAJO, Takaaki SHIGEMATSU and Shinya UMASE

A new algorithm of a 3D particle tracking velocimetry, 3D-PLCV is developed. The significant feature is the use of images capturing path lines without any blind duration between sequential images. Hence, particle matching becomes very easy by connecting path lines in sequential images. Further, use of information of connected path line is useful to restrain generation of ghost tracers in stereo-matching. After description of details of the algorithm of the 3D-PTV developed in this study is presented, validity of the 3D-PTV is shown using artificial images. Finally, measurement result of fluid flow in pore of porous media by the developed PTV is presented.

### 1. はじめに

海岸や河川において,砂粒子の輸送や透過性構造物間 隙部の流動を考える際の,最も基礎的なモデル化した流 れとして多孔質体間隙部の流動が考えられる.多孔質体 間隙の幾何形状は複雑な三次元構造を有しており,計測 および数値計算は一般的に困難である.著者らはこれま でに,屈折率整合法を用いた画像計測(PTV)を用いて, 多孔質体間隙部およびその近傍の速度分布の面的計測を 行ってきた(中條ら,2008).その結果,Re数やKC数が 間隙部の乱流量に及ぼす影響については明らかにされつ つある.しかし,多孔質体間隙部の流動は本質的に三次 元性を有する流れであり,従来の断面二次元計測のみで は,必ずしも十分な知見が得られているとは言い難い.

また,多孔質体間隙部では図-1に示すように速度勾配 の大きな流れ場が観察されており,撮影されるトレーサ ー画像には線状の流跡線として撮影されるものが多く含



1	学生会員	修(工)	大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 日本学術振興会特別研究員DC2
2	正会員	博(工)	大阪市立大学准教授工学研究科都市系専攻
3	学生会員	学(工)	大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻

まれる. これまでの計測では, 流体運動を計測するため に Super-Resolution KC法(竹原ら, 2000)を用いていた が, この手法では凍結撮影を必要とするために, 高速度 域と低速度域が混在する場では計測が困難であった. ま た今後さらに高レイノルズ数流れを計測するためにも, 流 跡線画像を利用した画像計測法の開発は有用である.

そこで本研究では,流し撮影法により得られる流跡線 画像を用いた2視点系三次元PTVを開発し,その利用可能 性について精度や利便性の観点から検討を行った.

#### 2. 三次元流跡線連結法(3D-PLCV)

#### (1) 流跡線連結法 (PLCV) の特徴

既存の画像計測法は、その撮影法により図-2のように 分類できる.凍結撮影法は微小な露光時間 $T_E$  (Exposure time) で撮影し、円形のトレーサー画像 (Frozen image) を得ることで重心位置を確定し、次時刻の重心移動距離 を推定する手法である (図-2 (a)). この手法の場合, 移 動距離が長いほど連続時刻間の対応精度は低下するため に、測定速度に応じた撮影間隔の設定が要求される.ま た、トレーサー移動速度に対して比較的長い露光時間T<sub>E</sub> が設定された場合(従来の流跡線法または流し撮影法、例 えば, Taniら, 2002)), シャッター開閉時間T<sub>s</sub> (Shuttering interval) 中のトレーサーの移動軌跡(流跡線:Particle streak image) として撮影される (図-2 (b)). このトレーサー軌 跡の長さとT<sub>s</sub>の関係から速度の大きさが算定できるが、そ の流向の決定には不確かさを含んでいる. この不確かさ は、撮影間隔 $T_C$  (Capturing interval) と $T_S$ の差(損失時 間 $T_L$ :Loss interval) が縮まるほど低下し、 $T_C=T_S$ となる条 件においてはその流跡線の端点は一致する(図-2(c)). これが重松ら(2006)の提案する流跡線連結法(PLCV) である. PLCVは以上の撮影条件から、(1) 二時刻間対応 が容易であり、(2) 凍結撮影条件を必要としない、とい

Shutter open Shutter close  $\square$  Exposure time  $T_E$  $T_S$ : Shuttering interval  $T_M$ : Measurement interval  $T_L$ : Loss interval T<sub>C</sub>: Capturing interval Traditional method (a) Frozen image time (b)Particle streak image time  $T_M$ PLCV (c) Particle streak image time  $t + \Delta t$  $T_M = T_S = T_C$ 

図-2 画像計測法の撮影法による分類

う利点を有している.本研究ではこの二次元PLCVを三次 元計測法へと拡張する.

(2) 三次元流跡線連結法(3D-PLCV)の概要

新たに開発された三次元流跡線連結法(3D-PLCV)の 解析フローを図-3に示す.ステレオ撮影法では、一対の カメラ画像 $I_1$ および $I_2$ の画像座標( $\xi_1, \zeta_1$ )および( $\xi_2, \zeta_2$ )と撮影条件に依存する校正係数から構成されるカメ ラモデルにより三次元座標(X, Y, Z)を構築する(図-4 参照).本計測法ではこの校正係数の算定に、Watanabeら (2006)の提案する三次代数方程式モデルを用いている.

撮影された流跡線画像に対しては2D-PLCVと同様に, (1) トレーサー識別のための二値化,(2) 流跡線(トレ ーサー重心軌跡)決定のための細線化を経て,(3) 端点 座標の抽出が行われる.(1) の二値化操作においては,近 江ら(2000)によって提案されている動的閾値設定二値 化法を用いる.これによって,背景にノイズ画像を含む 流跡線画像においても良好な識別が可能になることを確 認している.(2) および(3) の操作については重松ら (2006)と同様の手法を用いた.

次に,それぞれの撮影画像中の流跡線情報毎に識別番号を振り分ける(ラベリング).この際,交差流跡線は, 想定される全ての端点の組み合わせに対して別々の識別 番号を振り分ける点が従来の2D-PLCVと異なる.存在し 得ない流跡線候補は,後のステレオマッチングの際に除 去されるために,真の流跡線のみを選別することができ る.ただし,現在想定している交差流跡線の端点候補の 上限は6個まで(端点の組み合わせは<sub>6</sub>C<sub>2</sub>=15通り)であ り,それ以上の端点を有する流跡線情報は破棄する.

その後,分離された流跡線の各端点の探索領域 $\Delta$ 内に 存在する次時刻の流跡線端点を探索し,両時刻の流跡線 の始点・終点が決定される(時系列マッチング).対応付 いた各端点の画像座標 $p_e^n$ および $p_s^{n+1}$ は,流跡線連結の仮 定によれば一致するはずである.しかし,本手法では流



跡線抽出の段階で細線化処理を行っているために,推定 誤差が生じることがある.この誤差が次のステレオマッ チングおよび最終的な計測精度へ及ぼす影響は少なくな い.そこで,この影響を緩和するために, $P_e^n = P_s^{n+1} = (p_e^n + p_s^{n+1})/2 で算定される<math>P_e^n$ および $P_s^{n+1}$ をそれぞれ修正後 の時刻nの終点および時刻n+1の始点としている.また, 本研究では端点位置の推定精度を考慮して,探索領域を  $\Delta = 2pixel としている.$ 

#### (3) 2視点系ステレオマッチングの概要

従来よりステレオ計測法による多点計測では,異なる 視点間のトレーサー画像を対応付ける(ステレオマッチ ング)際の誤対応によって,現実には存在しない地点に 虚像を発生させてしまうことが問題であった.これを図 示すると図-5のようになる.あるトレーサーと各視点を 結ぶ直線で構成されるエピポーラ平面は,各画像上を図 のように横断している.この画像上に引かれたエピポー ラ線は各トレーサー毎に異なるために,各視点間で誤っ た対応付けを行った場合,カメラモデルにおいて( $\xi_1, \zeta_1, \xi_2$ )から推定される座標 $X_1$ と( $\xi_2, \zeta_2, \xi_1$ )から推定され る座標 $X_2$ には不整合( $|X_1-X_2|$ )が生じる.この不整合を ステレオマッチングの指標とすることができるが,実際 には図のように同一平面上に他のトレーサーが存在する



状況が生じ得る.実際には一致しないトレーサーを誤対 応させた場合は各視軸の交差点に虚像が発生する.また, これらの誤対応は撮影条件や重心位置の取得方法に起因 する誤差等の影響も受ける.この虚像の影響を除くため に,3台以上の視点が導入されることが多い(例えば,西 野(2000),Watanabeら(2006)).しかし,複数台のカメ ラを用いることは解析時間の増大につながる.

本手法では図-6のように流跡線情報を用いることによ り、虚像の発生確率を低下させることを試みる.すなわ ち、仮に各流跡線の一方の端点が虚像を発生させる位置 関係にあったとしても、十分に長い軌跡を考えれば、も う一方の端点はそれぞれ別の平面上にあるはずである.こ のように、複数時刻のトレーサー位置情報を用いること で、虚像の発生確率を低下させることができる.本研究 で使用したアルゴリズムでは、最大で5時刻分の連結流跡 線情報をステレオマッチングに使用している.しかし、そ れでも候補を絞りきれない場合は、不整合度|X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>|の総 和が最小となる候補を選択する.異なる視点間の対応す るトレーサーが決定された後には、座標X<sub>1</sub>とX<sub>2</sub>の平均値 を各流跡線の始点・終点の三次元座標とする.

#### 3.CG撮影画像を用いた精度検証

既知座標情報に基づく校正画像および流跡線画像を、レ イトレーシング法に基づく3D-CG作成ソフトウェアPov-Ray (http://www.pov-ray.org)を用いて作成し、それらを 上記のアルゴリズムで解析し、本計測法の精度検証を行 った。検証の指標としては検出率 $\phi_d = N_d/N$ および正答率  $\phi_c = N_c/N_d$ を用いて評価を行った(N:発生トレーサー数,  $N_d$ :得られた速度ベクトル数, $N_c$ :流向・流速の一致し た速度ベクトル数).実際には画像投影やカメラモデル等 に含まれる誤差のために、与条件と計測結果の座標は完 全には一致しない。そのため、まずは撮影画像から実座 標を校正する際の精度を見積もる必要がある。

#### (1) 三次元座標の校正精度

実座標の校正精度は各カメラの視軸間に形成される視 差角*θ*および撮影距離に依存すると考えられる.そこで,



θと校正精度の関係を図-7に示す.ここで縦軸のσは既知 である校正格子点の座標Rとそれらを校正画像から算定し た座標 $\gamma$ の差 $E=R-\gamma$ の標準偏差である.このσは撮影距離 によって変化するために,ここでは計測領域の重心位置 における空間解像度(例えば[pixel/cm])を乗じた $\sigma$ \*を示 している. $\sigma_x^*$ , $\sigma_y^*$ , $\sigma_z^*$ はそれぞれ各軸方向の誤差を表 し, $\sigma_E^*$ はそれらの合成誤差である.図より,いずれの成 分の誤差においても視差角 $\theta$ =90°付近で最小となり,そ の時の校正精度は $\sigma$ \*=0.1pixel程度である.一方で,  $\sigma$ \*=0.6pixel程度となる視差角条件も存在する.本研究で はこれらの結果を踏まえて,正答率 $\phi_d$ 算定の基準として, その誤差が4 $\sigma$ \*以内であるものを正答とした.

#### (2) 旋回流を対象とした計測精度の検証

検証は比較的単純な流れである一方向流や壁面せん断流 に対しても行ったが、本稿では次式で定義される、旋回流 (ステュワート渦流) に対して行った結果のみを示す.



ここでAは渦流速強度を表し、速度の単位を有するが、 ここでは計測領域の重心位置における解像度を用いた pixel /frameで表記する.また、Lおよびqはそれぞれ渦 径とせん断の強さを表すパラメータであり、Lについては  $L=\overline{W_v}/2$ と一定とした( $V_v$ は図-4で示した撮影領域の支配 体積).また、ここではz方向の速度成分は与えていない.





図-9 解析例 (N=500, A=150[pixel/frame], q=0.5)

図-8および図-9に作成した流跡線画像の一例とその解析例 を示す.

#### a)撮影間隔および速度勾配と計測精度の関係

実際の計測においては、撮影時間間隔をどの程度とす れば計測可能であるかが重要な関心事である.本手法の 場合,これは、撮影画像中の流跡線の長さがどの程度で あればよいか、という問題に置き換えることができる. そ こで,先に述べた渦流速強度Aの変化と計測精度の関係を 調べると図-10のようになる. Aの増加とともに検出率 ød が低下する理由としては、流跡線が長くなるほど、交差 頻度が増加するために,現在想定している端点の上限を 超えたことに由来するものが多い.しかし、それが正答 率 ø に 及ぼす 影響は比較的小さく, A=450 pixel/frame に おいても8割以上の計測値が正答している.

次に、速度勾配の影響を検討するために、せん断パラ



図-11 せん断パラメターqと検出率 $\phi_d$ および正答率 $\phi_c$ の関係

メータqが計測精度に及ぼす影響について図-11に示す.図 よりせん断パラメータqの変化はød,øcともにそれほど影 響を及ぼしていないことがわかる. すなわち、3D-PLCV においては流跡線の長さが ゆおよび ゆを決定付けている.

#### b)トレーサー数密度と計測精度の関係

図-12にトレーサー数密度N(撮影領域V,中のトレーサ ー数)と計測精度の関係について示す.図より、数密度N の増加は検出率もの低下を引き起こすが、正答率もの低 下率はそれと比較してゆるやかな傾向にあり,N=500と比 較的高密度条件(図-8参照)においても正答率 φ は 90% 以上を保っている.これらの結果は先の渦流強度Aの変化 における影響と類似しており,総合的に考えると, *o*,は 撮影画像中の流跡線情報が占める割合に依存していると 推測される.

#### 4. 多孔質体間隙部の流速測定への応用

最後に,多孔質体間隙部流れの計測に本手法を適用し た場合の計測事例から、実際の計測における課題点につ いて検討を行った、実験装置の概要を図-13に示す、装置 の詳細は中條ら(2008)と同様であり、断面寸法 B=H=10cm,長さ100cmの水平部を有する管水路を用いて 振動流  $V=V_0 \sin(2\pi t/T)$  を発生させた ( $V_0$ :速度振幅, T:振動周期).水路の中央部に設置された多孔質体模型 は直径D=2.0cmのシリコン球から成り(10×10×14cm: 間隙率 φ=0.34), その間隙部の流動を屈折率整合法(江藤 ら、1996)を用いて可視化計測を行った。本実験におけ る実座標校正の精度は7.85×10<sup>4</sup>mであった.

図-8 CG例 (N=500, A=150[pixel/frame], q=0.5)

図-14に多孔質体前面部および間隙部の空間平均流速



図-12 トレーサー数密度Nと検出率 $\phi_d$ および正答率 $\phi_c$ の関係



図-14 多孔質体前面部および間隙部平均流速の時間変化

(それぞれ〈U<sub>ouv</sub>〉、〈U<sub>in</sub>〉:流軸方向成分)の時間変化を示 す.〈U〉は振動板の運動に合わせて正負に変動しており, 一定の速度以上となる位相では,前面部の流速に比べて 間隙部の流速には大きな速度欠損が見られる.これは前 報(中條ら,2008)において断面二次元計測結果から得 られた知見と一致している.しかし,間隙部の計測ベク トル密度は約0.31個/cm<sup>3</sup>(計測領域V<sub>v</sub>中に約150個程度) とかなり低密度であり,今後乱流量を検討するに際して は,やや情報量が不足していると考えられる.この直接 的な原因としては、光源の強度不足やトレーサーが比較 的小径であったために、鮮明な流跡線画像が得られなか ったことがあげられる.このため、端点の抽出精度が低 下し、ステレオマッチングの条件を満たす流跡線数が少 なかったと推測される.

### 5. 結論

(1)流跡線の端点情報を用いたステレオマッチングにより、二視点系撮影においてもトレーサーの誤対応を低減し、高精度な三次元計測を達成できることが示された.
(2)ステレオマッチングの過程で交錯流跡線画像の分離解析が可能であり、トレーサーが高密度に分布する場であっても適用可能である。(3)トレーサー数密度Nや渦流速強度Aの増加とともに検出率φ<sub>d</sub>は低下するが、正答率φ<sub>c</sub>はそれに比べてゆるやかな低下を示す。(4)水槽実験より、多孔質体間隙部のように複雑流路内の三次元速度分布についても計測可能であることが確認された。ただし、今後高密度な流れ場の計測を行うためには、撮影画像の質を向上させ、端点を精度よく抽出する必要がある。

#### 参考文献

- 近江和生・李 航宇・D. H. Lam (2000): PTVにおける粒子 画像抽出の新アルゴリズム,可視化情報, Vol. 20, No. 79, pp. 333-341.
- 重松孝昌・河野哲也(2006):斜面上を運動する粒子群に誘起 される流体運動に関する実験的研究,海岸工学講演会,第 53巻, pp. 136-140.
- 竹原幸生・R. J. Adrian · 江藤剛治(2000): KC法を用いた Super-Resolution PIVの提案,水工学論文集,第44巻, pp. 431-436.
- 中條壮大・重松孝昌・坂下直也・辻本剛三・竹原幸生(2008) :振動流特性が多孔質体誘起乱流に及ぼす影響に関する研 究,海岸工学論文集,第55巻, pp. 841-845.
- 西野耕一 (2000): 3次元 PIV の実用化に向けて,可視化情報, Vol. 20, No. 77, pp. 113-119.
- 江藤剛治・竹原幸生・横山雄一・井出康夫(1996):水流の可 視化に必要な関連技術の開発-比重整合法,屈折率整合法, 多波長計測-,土木学会論文集,No.566, pp.84-106.
- Lam, L., S. W. Lee, C. Y. Suen (1992) : Thinning methodologies A comprehensive survey, IEEE, Vol. 14, pp. 869-885.
- Tani, N., H. Kondo, M. Mori, K. Hishida, M. Maeda (2002) : Development of fiberscope PIV system by controlling diode laser illumination, Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 752-758.
- Watanabe, Y., Y. Hideshima, T. Shigematsu, K. Takehara (2006) : Application of three-dimensional hybrid stereoscopic particle image velocimetry to breaking waves, Measurement science and technology, Vol. 17, pp. 1456-1469.