A 2 1 2

流跡線画像を用いた三次元 PTV(3次元流跡線連結法)の開発

馬瀬 慎也[○](大阪市立大学), 中條 壮大(大阪市立大学), 重松 孝昌(大阪市立大学)

Development of a 3-D PTV using stereoscopic images capturing path lines without respite of exposure

Shinya UMASE, Sota NAKAJYO and Takaaki SHIGEMATSU

ABSTRACT

For measurement of complex fluid flow, a particle tracking velocimetry using stereoscopic images is developed. To obtain velocity directions from particle streak images, a simple detection technique is used. The measurement principle is described in details. Validation is examined by using images capturing numerical tracers and a laboratory experimental result to measure flow in a stirred tank is also presented.

Keywords: 3D Image Velocimetry, PTV, Stereoscopic Photogrammetry, Path line

1. はじめに

画像計測手法を用いた流体運動の計測は、瞬時に多点における流速を得ることができるため、点計測を主体とした流速計測手法と比較すると、効率的であり、かつ、流れの時・空間構造を把握するのに優れていると言える。高速度カメラ(たとえば, Etoh *et al.*¹⁾)や光源の高機能化によって、速度の速い流体運動の可視化も可能になり、二次元計測に関する研究および計測事例は数多く見られる。一方、自然界に見られる流れは基本的には三次元性を有していることを考えれば、流体運動の実現象を理解するためには高精度な三次元計測が求められ、近年では三次元画像計測手法の開発も盛んになってきている。

三次元画像計測手法におけるもっとも大きな課題のひとつは、トレーサ粒子の三次元座標を正確に求めることであろう。トレーサの撮影は、シート光を奥行き方向にスライドさせてシート内のトレーサを撮影することによって空間的なトレーサの分布を把握する Scanning PIV(PTV)と、計測領域内のトレーサを異なる視点から撮影することによってトレーサの空間分布を把握する Stereo PIV(PTV)に大別できる。厳密な意味での三次元計測、および、測定装置の簡潔さを勘案すれば、Stereo PIV(PTV)が優れていると言える。

現在では凍結画像を用いて流れを可視化している事例が多いように思われるが、ステレオ撮影された凍結画像からトレーサの三次元座標を求める際には、実在するトレーサだけでなく、エピポーラ線の交点に実在しない虚像トレーサが出現する可能性が高くなる(Fig.1 参

照)²⁾。このような虚像トレーサの発生を抑制するために、しばしば3台のカメラを用いた撮影が行われるが、このことは取得する情報量の増加、解析アルゴリズムの複雑化、その結果として、解析の長時間化を招くことになる。

一方、流し撮影を行って流跡線を撮影することによって流速を求める研究事例もある。1枚の撮影画像から、露光時間と流跡線の長さから流速が直接求められることが利点であるが、連続して撮影される画像間に時間の隔たりがあったために流向を判別することが困難で、それ故に、様々な撮影上の工夫が考案されている。

著者らは、連続光源を用いて流し撮影を行い、撮影時間間隔と露光時間を一致させることによって、理論上、流跡線画像が連続して撮影される画像間で途切れないように撮影することによって、流向を判別することができ

Fig.1 Generation mechanism of ghost tracers by 3-D stereo matching method

る二次元流体運動計測アルゴリズム(二次元流跡線連結法: 2D-PLCV と称す)を開発している。本研究は、これを三次元アルゴリズム(三次元流跡線連結法: 3D-PLCV と称す)へと拡張を試みた。ここでは、そのアルゴリズムの詳細を示したのちに、人工画像を用いてその精度の検証を行うとともに、旋回流れの計測に適用した結果について報告する。

2. 3次元流跡線連結法のアルゴリズム

本手法は、2台のカメラを用いて流体中に混入されたトレーサーを流し撮影することによって、ある時刻に撮影された流跡線の空間分布を求めるとともに、流し撮影時間と流跡線の長さから流速情報を得たのち、連続して撮影された画像から得られる流跡線情報に基づいて流向を決定しようとするものである。すなわち、個々のトレーサーを追跡して流体運動を解析する PTV 法に分類される手法である。

本手法のアルゴリズムは、(1)それぞれのカメラで撮影された画像平面の時系列マッチングと、(2)三次代数方程式カメラモデル³⁾を用いたステレオマッチングとから成る。本手法は、ステレオマッチングによって空間座標を構成する際に、(1)の時系列マッチングの情報を利用することによって虚像の発生を抑制しようとする点に獨創性を有する。以下に、アルゴリズムの詳細を記す。

2.1 2次元流跡線連結法の概要

2.1.1 前処理および二値化

撮影画像には、計測に必要なトレーサー以外の不必要な情報を含んでいることが少なくない。本研究では、一連の画像情報から平均画像を求めた後、個々の画像から時間平均画像を減算することによって不必要情報を除去している。さらに、大津の方法⁴⁾を用いて二値化を行い、トレーサー情報のみを抽出し、ラベリングを行う。

2.1.2 端点の抽出

流跡線の長さを求めるために、二値化画像に Lam *et al.*⁵⁾の方法を適用して流跡線に細線化処理を施し、端点を抽出する。端点の抽出に当たって、細線化された流跡線を構成する画素は、「端点」、「分岐点」、「交差点」、「連続点」に分類される。流跡線が交差することなく単独で撮影されている場合には、端点と判断される画素が2個だけであるので、これらを端点候補として記憶する。流跡線が重なって撮影されている場合には、複数の「端点」に加えて「分岐点」や「交差点」も端点候補となり得る。そこで、この段階では候補となり得る m 個の各画素に対して ${}_m C_2$ 個の端点の組み合わせを想定して記憶する。この際に、新たに ${}_m C_2 - 1$ 個のラベル番号を追加し、別々の流跡線候補として取り扱うことで、交差流跡線の分離が可能となる。また、本手法では「連続点」に端点を含む交差流跡線については識別不可能であることを付記しておく。

2.1.3 流跡線連結

時刻 n に撮影された画像 I^n 中のラベル番号 k の流跡線情報だけを用いて、その流跡線 PL_k^n の2つの端点のいずれが始点で終点であるかを判別することはできない。しかし、本計測システムのように流し撮影された場合、 PL_k^n のいずれかの端点の位置には、次時刻の画像 I^{n+1} 中に PL_k^{n+1} の端点が撮影されているはずである。すなわち、 PL_k^n と連結する PL_k^{n+1} を唯一求めることができれば、 PL_k^n の始点と終点が決定できることになり、その結果、 PL_k^{n+1} の始点および終点も決定できることになり、流向が決定される。実際には端点を抽出する際に含まれる誤差の影響を考慮するために、この段階では PL_k^n に対して複数の連結流跡線候補 PL_k^{n+1} の存在を許容する。ただし、 PL_k^n に連結する PL_k^{n+1} を唯一に決定することが PL_k^n の情報は破棄している。連結される流跡線の抽出法の詳細は、重松ら^{6), 7)}を参照されたい。

2.1.4 端点情報の修正

理論上は端点の位置は一致するはずであるが、細線化処理を施しているなどの影響で必ずしも端点位置が一致するとは限らない。したがって、 PL_k^n の終点と PL_k^{n+1} の始点との間にズレが生じる場合があり、これが後述のステレオマッチングによる三次元座標の構築やミスマッチング、流速の計測精度に影響を及ぼす。そこで、以下の操作を施すことによって、端点情報を修正する。Fig.2に示すように、連続する二時刻間に対応付いた流跡線が得られ、それぞれにおいて始点・終点が決定されたとする。この例では、 PL_k^n の終点座標 $PL_{kE}^n(\xi_1, \zeta_1)$ と PL_k^{n+1} の始点座標 $PL_{kS}^{n+1}(\xi_2, \zeta_2)$ は一致していない。そこで、この段階で決定された PL_{kE}^n と PL_{kS}^{n+1} を仮端点座標と見なし、この2点を結ぶ線分上に真の端点座標 $P_r(\xi_r, \zeta_r)$ が存在すると考える。この P_r は、 PL_{kE}^n と PL_{kS}^{n+1} を結ぶ線分を二時刻の流跡線長さで重み付けした分点とすることも可能ではあるが、今回は簡便に中点として求めている。

2.2 ステレオマッチングによる三次元座標の構成

カメラによって撮影された画像は、カメラレンズの歪みや実験水槽壁面などの様々な擾乱要因を内包している。したがって、単純な光学的関係から高精度な三次元座標が得られる保証はない。このような擾乱要因を排除する

Fig.2 Modification of a coordinate of an endpoint of a path line

Fig. 3 Illustration of relationship between a volume of view and cameras

手法の一つとして、渡部³⁾によって開発された三次代数方程式を用いた画像平面座標と三次元空間座標を関連づける方法を用いた。

2.2.1 キャリブレーション

Fig. 3 に示すように、マーカーが描かれたキャリブレーションボードを奥行き方向に等間隔にトラバースし、各位置で画像を撮影する。これらのマーカーの図心位置の三次元座標は既知であるので、撮影画像平面におけるそれぞれのマーカー図心平面座標と三次元空間座標を次式に代入し、カメラ校正係数を得る。

$$\begin{aligned} X = & a_1 \xi_i \zeta_j + a_2 \xi_i^2 \zeta_i + a_3 \xi_i^2 \zeta_j + a_4 \zeta_i^2 \xi_i \\ & + a_5 \zeta_i^2 \xi_j + a_6 \xi_j^2 \xi_i + a_7 \xi_j^2 \zeta_i + a_8 \xi_i^3 \\ & + a_9 \zeta_i^3 + a_{10} \xi_j^3 + a_{11} \xi_i \zeta_i + a_{12} \xi_i \zeta_j \\ & + a_{13} \zeta_i \xi_j + a_{14} \xi_i^2 + a_{15} \zeta_i^2 + a_{16} \xi_j^2 \\ & + a_{17} \xi_i + a_{18} \zeta_i + a_{19} \xi_j + a_{20} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Y = & b_1 \xi_i \zeta_j + b_2 \xi_i^2 \zeta_i + b_3 \xi_i^2 \zeta_j + b_4 \zeta_i^2 \xi_i \\ & + b_5 \zeta_i^2 \xi_j + b_6 \xi_j^2 \xi_i + b_7 \xi_j^2 \zeta_i + b_8 \xi_i^3 \\ & + b_9 \zeta_i^3 + b_{10} \xi_j^3 + b_{11} \xi_i \zeta_i + b_{12} \xi_i \zeta_j \\ & + b_{13} \zeta_i \xi_j + b_{14} \xi_i^2 + b_{15} \zeta_i^2 + b_{16} \xi_j^2 \\ & + b_{17} \xi_i + b_{18} \zeta_i + b_{19} \xi_j + b_{20} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z = & c_1 \xi_i \zeta_j + c_2 \xi_i^2 \zeta_i + c_3 \xi_i^2 \zeta_j + c_4 \zeta_i^2 \xi_i \\ & + c_5 \zeta_i^2 \xi_j + c_6 \xi_j^2 \xi_i + c_7 \xi_j^2 \zeta_i + c_8 \xi_i^3 \\ & + c_9 \zeta_i^3 + c_{10} \xi_j^3 + c_{11} \xi_i \zeta_i + c_{12} \xi_i \zeta_j \\ & + c_{13} \zeta_i \xi_j + c_{14} \xi_i^2 + c_{15} \zeta_i^2 + c_{16} \xi_j^2 \\ & + c_{17} \xi_i + c_{18} \zeta_i + c_{19} \xi_j + c_{20} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 X, Y, Z は 3 次元座標を、 ξ, ζ は画像平面座標を表し、 $a_1 \sim a_{20}, b_1 \sim b_{20}, c_1 \sim c_{20}$ はカメラ校正係数を、下添え字の i, j はカメラ番号をそれぞれ表す。カメラ校正係数は、計測範囲内に存在する既知の三次元座標と各カメラによる撮影画像座標を用いて、最小二乗法により算定する。

2.2.2 ステレオマッチングと三次元速度分布の取得

前述のように、2 台のカメラで撮影された凍結画像に基づくステレオマッチングではゴーストトレーサの発生を抑制することは困難である。一方、Fig. 4 に示すよ

Fig. 4 Stereo-matching using path line information

うに、流し撮影によって得られる画像を用いる場合には、1 個のトレーサに対して 2 個の端点の情報を有しているため、流跡線の一方の端点がエピポーラ線上に不可分な位置にあったとしても、もう一方の端点においても同様の位置関係にある可能性は低いと考えられる。このように、複数時刻におけるトレーサ位置情報を用いることで、ゴーストの発生確率を低下させることができる。本手法では流跡線連結条件を用いるために時系列マッチングの精度が高く、撮影間隔よりも長時間にわたってトレーサを追跡することが可能であり、その場合、虚像の発生をさらに抑制することができると考えられる。以下にステレオマッチングの手順について記す。

- (1) カメラ A によって時刻 n に撮影された画像中のラベル番号 k の流跡線の始点の画像平面座標 ${}_A P_{kS}^n$ および終点のそれ ${}_A P_{kE}^n$ と、これに連結される時刻 $n+1$ に撮影された画像中のそれら ${}_A P_{kS}^{n+1}, {}_A P_{kE}^{n+1}$ の三次元座標を求める。このとき、三次代数方程式を用いて例えば ${}_A P_{kS}^n$ の三次元座標を求める場合には、カメラ B によって撮影された画像中のラベル番号 l' の流跡線端点情報を用いる必要があるため、それらを $({}_A P_{k'S}^n, {}_A P_{k'E}^n = {}_A P_{k'S}^{n+1}, {}_A P_{k'E}^{n+1})$ と記すことにする。同様に、カメラ B によって撮影された画像中のラベル番号 l のトレーサに対する流跡線端点の組み合わせ $({}_B P_{k'S}^n, {}_B P_{k'E}^n = {}_B P_{k'S}^{n+1}, {}_B P_{k'E}^{n+1})$ を求める。
- (2) ラベル番号 l に対応する l' 、およびラベル番号 k に対応する k' を用いて計算された、例えば、 ${}_A P_{k'S}^n$ と ${}_B P_{k'S}^n$ はほぼ同じ三次元座標として求められるはずである。したがって、 $DL = |{}_A P_{k'S}^n - {}_B P_{k'S}^n| + |{}_A P_{k'E}^n - {}_B P_{k'E}^n| + |{}_A P_{k'S}^{n+1} - {}_B P_{k'S}^{n+1}|$ が最小となる k', l' を求める。これによって、カメラ A による撮影画像中のラベリング番号 k の流跡線とカメラ B による撮影画像中のラベリング番号 l の流跡線が対応づけられたことになる。
- (3) このようにしてステレオマッチングされた流跡線の端点の三次元座標は、例えば、 ${}_A P_{k'S}^n$ と ${}_B P_{k'S}^n$ の単純算術平均値とする。

3. CG 画像を用いた計測精度の検証

3.1 検証方法

3次元流跡線連結法の計測精度の検証に当たっては、発生させたトレーサー総数 N に対して流速・流向を決定することができたトレーサー数 N_{AB} の割合を表す検出率 $\phi_d = N_{AB}/N$ と、 N_{AB} のうち流速・流向の計測結果が与えた流向・流速値と一致したトレーサー数 N_c の割合を表す正答率 $\phi_c = N_c/N_{AB}$ を用いて評価する。人工画像の作成段階において必然的に生じる誤差などの影響を受けて、流跡線端点の三次元座標の計測結果は、与えた値と全く同じになることはない。そこで、画像作成段階に発生する誤差を考慮して、 $2^{1/2}$ pixel に相当する距離 Ea を誤差許容値とし、流跡線の始点における計測値と真値との差 Er_s 、および終点におけるそれ Er_e のいずれもが、 Ea よりも小さい場合に、その計測値は正答を得たと判断した。これらの誤差は長さの単位を有するので、計測領域の代表長さ $L = V^{1/3}$ で正規化して、 $Em = Er_{e(s)}/L$ で評価する。

ここでは、典型的な多方向性2次元せん断流であるスチュワート渦を対象として、渦軸の方向、および、トレーサー数密度と計測精度の関係について検証を行った。 z 軸方向に中心ベクトルを持つスチュワート渦は次式で表される。

$$u = \frac{U \sinh(2\pi y/R)}{\cosh(2\pi y/R) - q \cos(2\pi x/R)} \quad (4)$$

$$v = \frac{-Uq \sin(2\pi x/R)}{\cosh(2\pi y/R) - q \cos(2\pi x/R)} \quad (5)$$

ここに、 U は流速の大きさ、 $q(0.0 < q < 1.0)$ はせん断の強さ、 R は渦列間の距離を表すパラメータである。ここでは、 U を $L/80$ 1/frame、 $q=0.5$ 、 $R=15L/8$ (画像 x 方向の長さに対応) として与えた。

人工画像は、以下のような手順で作成した。まず、2台のカメラの視差角度が 90° となるようにカメラ位置を決定し、2台のカメラを含む水平面上に X 軸および Y 軸を、この平面の法線方向に Z 軸を設定した。任意の位置 (x_0, Y_0, Z_0) にトレーサーを発生させて流跡線の始点とし、式(4)および式(5)を用いて流速を計算して時間 Δt 後の位置を求めて終点とした。このようにして求めた流跡線を Pov-Ray を用いて透視図法に基づく各カメラ位置から見た平面画像を得た。このとき、トレーサー密度は、 277 個/ 10^6 pixel² であった。

3.2 検証結果

計測結果の一例を Fig.5 および Fig.6 に示す。Fig.5 は、それぞれのカメラで撮影された画像に基づいて、2D-PLCV を用いて流跡線の時系列マッチングを行った結果を示したものである。本手法では、まず、画像平面において時系列マッチングを行って連結することができた流跡線のみが抽出されるので、各カメラによって撮影された平面画像内の複雑なトレーサーの運動が追跡できていることが、Fig.5 より明瞭に見て取ることができる。Fig.6 はこれらの結果を基にステレオマッチングを行って3次元流動場を再現した結果を示したものである。同

(a) A result from images captured by camera A

(b) A result from images captured by camera B

Fig.5 A result of 2-D PLCV

Fig.6 A measured swirling flow by 3-D PLCV

図より、本研究で提案する3次元流跡線連結法によって3次元流れの計測が可能であることがわかる。

Fig.7 Effect of swirling axis direction on detection rate ϕ_d and correctly measured rate ϕ_c

Fig.8 Relationship between Measurement error and swirling axis direction

Fig.7 は、スチュワート渦の渦軸を変えて人工画像を作成し、それぞれの場合における検出率 ϕ_d と正答率 ϕ_c を示したものである。Fig.7 によれば、 ϕ_d および ϕ_c はそれぞれ、91%および93%程度であり、渦軸の方向に依存しないことがわかる。

正答を得たと判断されたトレーサーについて計測誤差を検証した結果を Fig.8 に示す。スチュワート渦軸の方向にかかわらず、誤差 Em は 0.2×10^{-2} 程度でピークを持つような分布をしていることがわかる。すなわち、本手法を用いて正答を得たと判断された流跡線の端点は、計測領域代表長さの 0.2% 程度の誤差を有し、渦軸の方向、すなわち、流向にはほとんど依存しないことがわかる。

Fig.9 は、トレーサー数密度を $462 \sim 832$ 個/ 10^6 pixel^2 と変化させて検証を行った場合の、検出率 ϕ_d 、正答率 ϕ_c に及ぼす影響を検討した結果を示したものである。ここで行った精度検証の結果によれば、数密度の増加とともに検出率が低下し、それとともに正答率も低下することがわかる。

Fig.9 Effect of a number density of tracers on detection ratio and correctly measured ratio

4. 3次元流れの計測への適用例

本手法を用いて、攪拌水槽内の流れを計測した。実験には、 $14\text{cm} \times 14\text{cm} \times 22\text{cm}$ の水槽内に水深約 18cm となるように水を入れ、攪拌磁石を用いて攪拌流を発生させた。2台のカメラを用いて撮影間隔 60fps 、露光時間 $1/60\text{s}$ で画像を撮影した。キャリブレーションは、リニアモーションコントローラ ESMC-K (オリエンタルモーター製) を用いて、 2cm 間隔でマーキングしたキャリブレーションボードを 1cm 間隔で移動させた。カメラは水槽側面から 51cm の距離に推測側面に平行して設置し、カメラ間の距離は 32cm であった。光源には、メタルハライド光源 (250W) を用い、X 軸の正方向から撮影領域を照射した (Fig.10 参照)。

計測結果を Fig.10 に示す。同図は、 0.25 秒 (15 フレーム) 間に計測された流速ベクトルを示したもので、図中の星印は攪拌磁石の回転位置を示している。撮影画像中に気泡が多く存在していたため、二値化操作の段階で十分な数のトレーサーが検出できていなかったが、Fig.10 に示すように、複雑な攪拌流が計測できていることがわかる。すなわち、トレーサーが、回転している攪拌磁石の鉛直線上に引き寄せられながら、また、Y 軸方向に大きく移動しながら降下していく様子が計測されている。トレーサーの分布に偏りがあるのは、光源の設置状況が大きく影響しているためである。

5. まとめ

本研究では、撮影時間間隔と露光時間を等しくすることによって2台のカメラを用いて流し撮影を行い、得られた流跡線情報に基づいて3次元流速を求める新しい画像流速計測手法を開発した。各カメラで得られた連続する画像を用いて時系列マッチングを行うことによって流向を求め、それぞれのカメラ画像から得られる情報を基にしてステレオマッチングを行うことによって空間情報を構築している。流跡線が時間的に連結されることを利用して、2台のカメラによって得られる画像から、ステレオマッチングの際の虚像の発生を抑制することができ、このことは解析の省時間化に結びついている。また、露光時間を長くとることができること、これに伴い撮影時間間隔も比較的長くとることができることなどから、流速の速い流体運動であっても、安価な計測機器を用いて計測することができる点にも利点を有している。より明瞭な画像を得るための撮影方法や交差流跡線の分離法などが、今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) Etoh TG, Mutoh H.: An image sensor of 1 Mfps with photon counting sensitivity, Proc. 26th Int. Conf. High Speed Photogr.

Photonics(2005), 5580: 301-7. Bellingham, WA: SPIE.

- 2) 西野耕一, 笠木伸英, 平田 賢, 佐田 豊: 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 機械学会論文集論 B 編, 第 55 巻 (1989) pp. 404-412.
- 3) 渡部靖憲, 秀島賢保, 佐伯浩, 三次元 Super-Resolution PIV の開発と碎波下の混相流への適用, 海岸工学論文集第 51 巻 (2004) pp. 106-110.
- 4) Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, IEEE Trans. Sys., Man, and Cybernetics, SMC-9, No.1 (1979) pp. 62-66.
- 5) Lam, L., W. W. Lee, C. Y. Sue: Thinning Methodologies - A Comprehensive Survey, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 14(9) (1992) pp. 869-885.
- 6) 重松孝昌, 河野哲也: 混相流研究の進展, 日本混相流学会 (2007) pp.141-148.
- 7) 重松孝昌, 中條壮太, 馬瀬慎也: 流跡線連結法による粒子群を取り巻く流体運動の計測, 第 12 回オーガナイズ度混相流フォーラム 2008-奈良, 一混相流の実験計測法一, 講演論文集, 日本混相流学会 (2008) pp.97-101.

Fig.10 Measured result of flow in stirred tank